

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Konstrukční úprava vstřikovací formy pro použití CO₂

The constructional adjustment of injection mould for the use of CO₂

Dalibor Kopáč

KSP - TP - 805

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld - *TU v Liberci*

Konzultant diplomové práce: Ing. Martin Seidl - *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	70
Počet tabulek	10
Počet obrázků	56
Počet příloh	0

Datum: 23.5.2008

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 - Strojní inženýrství

Diplomant: Dalibor Kopáč

Téma práce: Konstrukční úprava vstřikovací formy pro použití CO₂

The constructional adjustment of injection mould for the use of CO₂

Číslo DP: KSP - TP - 805

Vedoucí DP: doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld - *TU v Liberci*

Konzultant DP: Ing. Martin Seidl - *TU v Liberci*

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá bodovým chlazením vstřikovací formy pomocí CO₂. V experimentální části je vyhodnoceno rozložení teplotních polí na povrchu výrobku pomocí termovizní kamery. Dále je také hodnocena struktura výrobku pomocí polarizačního mikroskopu. Výsledkem práce je návrh konstrukční úpravy vstřikovací formy pro použití CO₂.

Abstract:

The thesis deals with the CO₂ spot cooling of injection mould. In the experimental part a distribution of the thermal fields at the product surface is analysed, by using a termovision camera. It also classifies structure of the product by using polarizing microscope. The result of this work is a proposal of structural adjustment of injection mould for the use of CO₂.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 23. května 2008

.....
Dalibor Kopáč
Bojetice 57
294 41 Dobrovice



Poděkování:

Velice děkuji členům KPS z oddělení tváření kovů a plastů, zejména pak doc. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi za cenné rady a připomínky k tvorbě diplomové práce, Ing. Martinu Seidlovi za čas strávený konzultacemi nad daným tématem a za spoustu informací k realizaci experimentálního měření. Dále děkuji ostatním členům katedry, kteří se podíleli více či méně na tvorbě diplomové práce.

Na závěr bych nechtěl opomenout poděkovat svým rodičům za plnou podporu během mého studia na TU v Liberci.



OBSAH

1 ÚVOD	10
2 TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ.....	11
2.1.1 Vstřikovací nástroj - forma.....	11
2.1.2 Vstřikovací cyklus.....	13
2.2 TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM	15
2.2.1 Tepelná bilance vstřikovacích forem.....	15
2.2.2 Vliv temperace na vlastnosti výstřiku	19
2.2.2.1 Vliv na morfologii výstřiku	20
2.2.2.2 Vliv na smrštění výstřiku	23
2.2.2.3 Vliv na povrch výstřiku	25
2.3 KONVENČNÍ ZPŮSOBY TEMPEROVÁNÍ	26
2.4 NEKONVENČNÍ ZPŮSOBY TEMPEROVÁNÍ	28
2.4.1 Ranque – Hilsch výrová trubice	29
2.4.2 Vložkování forem vysoce tepelně vodivými materiály	30
2.4.3 Temperační systém CONTURA	31
2.4.4 Temperace tepelnou trubicí.....	31
2.5 TEMPERACE FOREM POMOCÍ OXIDU UHLIČITÉHO	33
2.5.1 Charakteristika oxidu uhličitého	33
2.5.2 Kapalný oxid uhličitý pro technické aplikace	34
2.6 APLIKACE CO ₂ PŘI TECHNOLOGII TOOLVAC.....	34
2.7 APLIKACE CO ₂ PŘI BODOVÉM CHLAZENÍ.....	37
2.7.1 Problémy při konvenčním chlazení temperačními kanály	37
2.7.2 Princip chlazení	37
2.7.3 Výhody technologie a možné použití	40
2.8 POLARIZAČNÍ MIKROSKOPIE	41
2.9 TERMOVIZNÍ MĚŘENÍ TEPLoty	42
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	43
3.1 VYBRANÝ PLASTOVÝ DÍL.....	43



3.2	POUŽÍVANÝ MATERIÁL.....	44
3.2.1	Charakteristika amorfního materiálu	44
3.2.2	Charakteristika semikrystalického materiálu	45
3.3	POPIS VSTŘIKOVACÍ FORMY	46
3.3.1	Způsob temperace formy.....	46
3.4	VSTŘIKOVACÍ STROJ	48
3.5	PODMÍNKY VSTŘIKOVÁNÍ	49
3.6	TERMOVIZNÍ MĚŘENÍ	50
3.6.1	Termovizní kamera ThermoCAM E320	50
3.6.2	Experimentální měření teplotních polí	51
3.7	NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURA	60
4	VYHODNOCENÍ	62
4.1	VYHODNOCENÍ TERMOVIZNÍHO MĚŘENÍ.....	62
4.2	VYHODNOCENÍ NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURY.....	63
5	KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA VSTŘIKOVACÍ FORMY PRO POUŽITÍ CO₂	64
6	ZÁVĚR.....	66
	LITERATURA.....	68



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ABS	- akrilonitril-butadien-styren
PA	- polyamid
PA 6	- polyamid 6
PA 6-GF	- polyamid se skleněnými vlákny
PA 66	- polyamid 66
PA 66-GF	- polyamid 66 se skleněnými vlákny
PP	- polypropylen
PC	- polykarbonát
PC-GF	- polykarbonát se skleněnými vlákny
HDPE	- vysokohustotní polyetylen
LDPE	- nízkohustotní polyetylen
PMMA	- polymetilmetakrylát
PP	- polypropylen
PS	- polystyren
SAN	- styrenakrylonitril
PEEK	- polyetereterketon
CO ₂	- oxid uhličitý
Be	- berilium
Cu	- měď
Q _{pl}	- tepelný tok mezi plastem a taveninou [W]
Q _{tm}	- tepelný tok mezi formou a temperačním systémem [W]
Q _{rb}	- tepelný tok mezi rozváděcím blokem vtokového systému a formou [W]
Q _o	- celkový tepelný tok mezi formou a okolím [W]
Q _{os}	- tepelný tok předaný do okolí sáláním [W]
Q _{op}	- tepelný tok předaný do okolí prouděním [W]
Q _{ov}	- tepelný tok předaný do okolí vedením [W]
m _v	- hmotnost výstřiku [kg]
Δh_p	- rozdíl měrných entalpií plastu při teplotě zpracování a při střední teplotě vyjmutí z formy [J.kg ⁻¹]
t	- čas [s]
t _{chl}	- doba chlazení [s]
k	- součinitel prostupu tepla [W.m ⁻² .K ⁻¹]
S	- teplosměnný povrch [m ²]
T	- teplota [°C], termodynamická teplota [K]



T_F	- teplota dutiny formy [°C]
T_{tm}	- teplota temperovacího média [°C]
T_O	- teplota okolí [K]
α_1	- součinitel přestupu tepla mezi taveninou a formou [W.m ⁻² .K ⁻¹]
α_2	- součinitel přestupu tepla mezi stěnou temperačního kanálu a temperačním médiem [W.m ⁻² .K ⁻¹]
λ	- součinitel tepelné vodivosti materiálu formy [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
x	- vzdálenost mezi plastem a temperačním kanálem [m]
S_V	- povrch styčné plochy mezi formou a rámem stroje [m ²]
S_P	- povrch styčné plochy mezi formou a okolím [m ²]
α_P	- součinitel přestupu tepla z formy do okolí [W.m ⁻² .K ⁻¹]
ξ_C	- součinitel záření absolutně černého tělesa [W.m ⁻² .K ⁻⁴]
T_m	- teplota tání krystalitů [°C]
T_g	- teplota zesklňování [°C]
T_x	- teplota nukleačního maxima [°C]
V_{max}	- maximální rychlost tvorby krystalitů
L_v	- délka výparné oblasti u tepelné trubice [m]
L_{ad}	- délka adiabatické oblasti u tepelné trubice [m]
L_k	- délka kondenzační oblasti u tepelné trubice [m]
e	- emisivita povrchu [-]
d	- průměr [m]
p	- tlak [Pa]



1. Úvod

Nejznámější a nejrozšířenější technologií na zpracování plastů je v současné době technologie vstřikování. Nynější trend v technologii zpracování plastů klade stále větší požadavky na kvalitu výrobku a přitom cena by měla být zachována (nebo v lepším případě klesat). Tyto dvě zdánlivě odporující si vlastnosti, lepší kvalita za stejnou nebo nižší cenu, závisí na několika faktorech, které je nutné před zahájením výroby důkladně promyslet a vyhodnotit. Jedná se například o vhodný výběr materiálu, tvaru a geometrii výrobku, způsobu zpracování apod. Mezi důležité faktory, které mají přímý vliv na vlastnosti budoucího výrobku, patří technologické podmínky výroby, při jakých se bude výrobek vstřikovat.

Jednou z těchto podmínek, u kterých lze dosáhnout zvýšení kvality a zároveň snížit dobu cyklu (a tím zvýšit produktivitu) je způsob temperace forem. Výstřik je totiž nutné ponechat ve formě do té doby, než-li dostatečně neztuhne i nejhůře chlazená oblast. Tato oblast určuje celkovou dobu chlazení, která je nejdelším časovým úsekem technologie vstřikování. Vhodnou optimalizací chlazení výstřiku lze dosáhnout zkrácení výrobního cyklu až o 20%.

Ideálním způsobem, kterého v praxi téměř nelze dosáhnout, je rychlý a rovnoměrný odvod tepla z formy a výstřiku.

Diplomová práce je zaměřena na temperaci forem, zejména pak na nekonvenční metodu chlazení výstřiku pomocí CO₂. Kapalného CO₂ jako teponosného média je použito ve dvou aplikacích, které se nazývají TOOLVAC a Spot cooling (nebo-li bodové chlazení). Obě aplikace mají za úkol zvýšit účinnost chlazení u tvarově složitých a tudíž obtížně chlazených výstřiků.

V experimentální části diplomové práce je pojednáno o měření teplotních polí na povrchu výstřiku po vyjmutí z formy. Měření bylo provedeno termovizní kamerou. Dále je v této části diplomové práce zkoumána nadmolekulární struktura výstřiku v polarizovaném světle mikroskopu.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo navrhnout konstrukční úpravu vstřikovací formy pro použití bodového chlazení pomocí CO₂. Návrh byl proveden za základě vyhodnocení teplotní analýzy povrchu a nadmolekulární struktury výstřiku. Pro konstrukční návrh byla použita již zaběhnutá forma s konvenčním temperačním systémem, který tvoří soustava kanálů s cirkulující vodou. Bodové chlazení je použito pouze jako doplňkový způsob odvodu tepla z hlediska chlazení problematických oblastí na vybraném výrobku, kterým byla loketní opěrka montovaná do automobilu Audi A3.

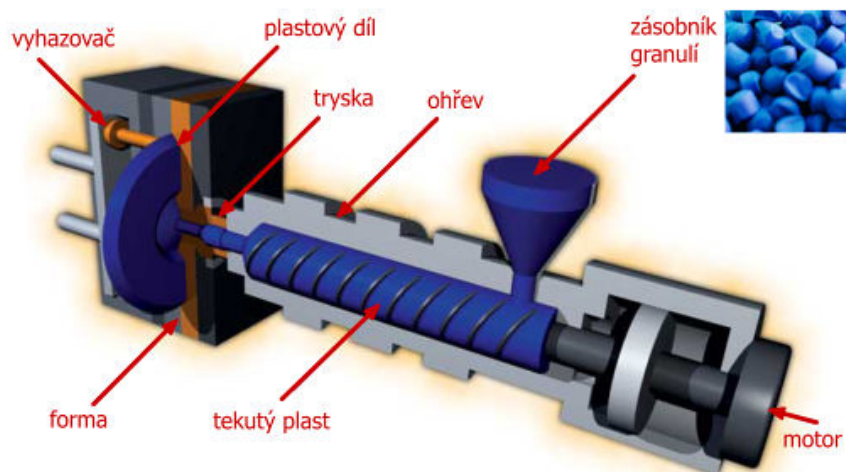
2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Technologie vstřikování plastů /1/

Vstřikování plastů je v současné době nejrozšířenější technologií na zpracování plastů. Vstřikovaný díl může být polotovarem, konečným výrobkem nebo pouze jednou z částí ke zhotovení finálního výrobku.

Mezi hlavní výhody technologie vstřikování patří možnost zpracovávat většinu známých plastů, zejména termoplasty, méně již reaktoplasty a kaučuky. V relativně krátkém časovém cyklu lze vyrábět i složité součásti, které mají velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesnost, jakost povrchu a také je možné během jednoho výrobního cyklu zhotovit několik desítek výrobků najednou. Jako hlavní nevýhodu lze označit vysoké počáteční náklady, cenu stroje a zejména časově zdlouhavou výrobu vstřikovací formy. Z těchto nevýhod je patrné, že tato technologie je vhodná pro hromadnou a velkosériovou výrobu.

Technologie vstřikování je založena na způsobu tváření polymerních materiálů, kdy se dávka roztaveného plastu vstřikuje značnou rychlostí do uzavřené tvarové dutiny formy, ve které ztuhne ve finální výrobek. Princip technologie je znázorněn na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Princip technologie vstřikování /29/

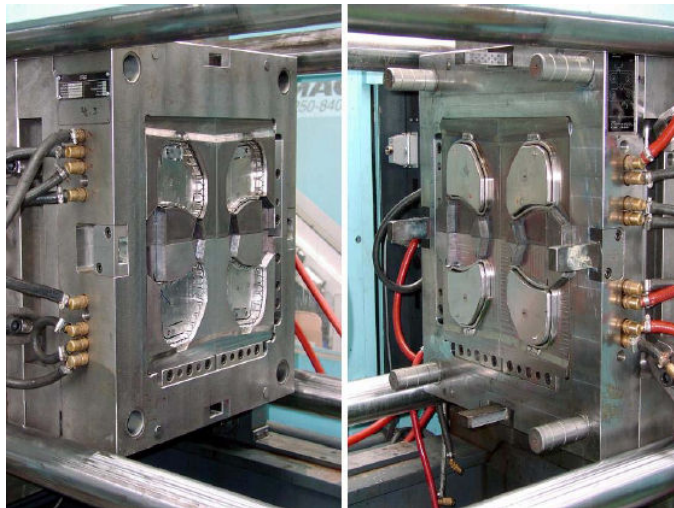
2.1.1 Vstřikovací nástroj – forma /2/, /3/, /4/, /9/

Nástroj na vstřikování plastů se nazývá vstřikovací forma. Konstrukčně i finančně je spolu se vstřikovacím strojem nejsložitější a nejdůležitější součástí procesu vstřikování. Účelem formy je vytvarovat taveninu do rozměrů budoucího

výrobku, který nese negativní tvar dutiny formy, a také umožnit snadné vyjmutí výrobku. Dalším z důležitých požadavků je odolnost vůči vysokým teplotám a tlakům.

Vstřikovací formy se dělí dle několika hledisek, např. podle počtu vyrobených kusů na jeden vstřik může být forma jednonásobná nebo vícenásobná (obr. 2.2), dle konstrukčního řešení se dělí formy na dvoudeskové, třídeskové, etážové, čelistové, vytáčecí, speciální apod. Další rozdělení může být z hlediska způsobu vyhazování výstřiku (s mechanickým vyhazováním, se stíracími kroužky, deskou, s trubkovým vyhazovačem aj.) nebo z hlediska konstrukce vtokové soustavy (se studenou nebo horkou vtokovou soustavou).

Mezi hlavní části formy patří vtokový, temperační a vyhazovací systém, upínací a vodící plochy a v neposlední řadě díly vymezující tvarovou dutinu formy.



Obr. 2.2: Praktická ukázka vícenásobné vstřikovací formy /3/

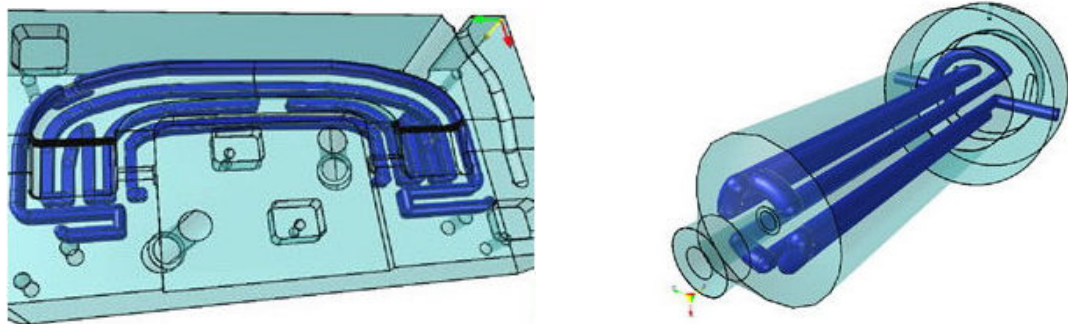
Tyto díly, které nám určí výsledný tvar a velikost vstřikovaného dílu, se nazývají tvárník a tvárnice. Tvárník je nejčastěji umístěn na pohyblivé části formy, tvárnice na pevné části. Oddělené jsou plochou, která se nazývá dělicí rovina. Při konstrukci formy a jejích tvarových ploch (tvárníku a tvárnice) je nutné stanovit rozměry a výrobní tolerance s přihlédnutím na smrštění zpracovávaného plastu a opotřebení nástroje. Z tohoto důvodu jsou rozměry tvarových ploch navrhovány větší než je skutečná velikost výrobku.

Co se týká produktivity, jakosti a kvality povrchu výstřiku, největší vliv má **vtokový systém**. Je tvořen soustavou kanálů s ústím vtoku, který slouží k rozvodu taveniny od trysky vstřikovacího stroje a k naplnění tvarové dutiny formy. Naplnění dutiny by mělo proběhnout co nejrychleji a bez větších teplotních nebo tlakových

ztrát. Proto je vhodné navrhnout vtokový systém tak, aby kanály byly co nejkratší s co největším průřezem a optimálním tvarem. Konstrukční řešení vtokového systému závisí zejména na tvaru výrobku a násobnosti formy, musí ale také zajišťovat snadné oddělení od výstřiku a vyhození vtokového zbytku.

Výrobek se při ochlazování ve formě smršťuje a zůstává na tvarových dílech formy (tvárník, tvárnice). Proto forma obsahuje **vyhazovací systém**, který je ovládán nejčastěji mechanicky, hydraulicky nebo pneumaticky. Skládá se z různých typů vyhazovačů (válcové, trubkové, ploché), vyhazovacích desek, vymezovacích kroužků, nárazníků, pneumatických nebo hydraulických ventilů. Mohou se používat i kombinace jednotlivých ovládaní vyhazovacích systémů nebo speciální způsoby vyhazování, např. vytáčecí systém.

Temperační systém (obr. 2.3) je soustava kanálů a dutin zajišťující přestup a prostup tepla z taveniny do formy a temperačního média, které udržuje teplotu formy na stanovené hodnotě během výroby v požadované toleranci (obvykle 3 - 5 °C). Bývá rozdělen minimálně do dvou dílčích okruhů. Jeden okruh temperuje pevnou část formy a druhý okruh pohyblivou část formy. Optimální řešení konstrukce temperačních okruhů má rozhodující vliv na jakost výstřiku, produktivitu a hospodárnost vstřikovací formy. Vzhledem k zaměření diplomové práce na temperaci vstřikovacích forem je toto téma dále rozšířeno v kapitolách 2.2, 2.3 a 2.4.

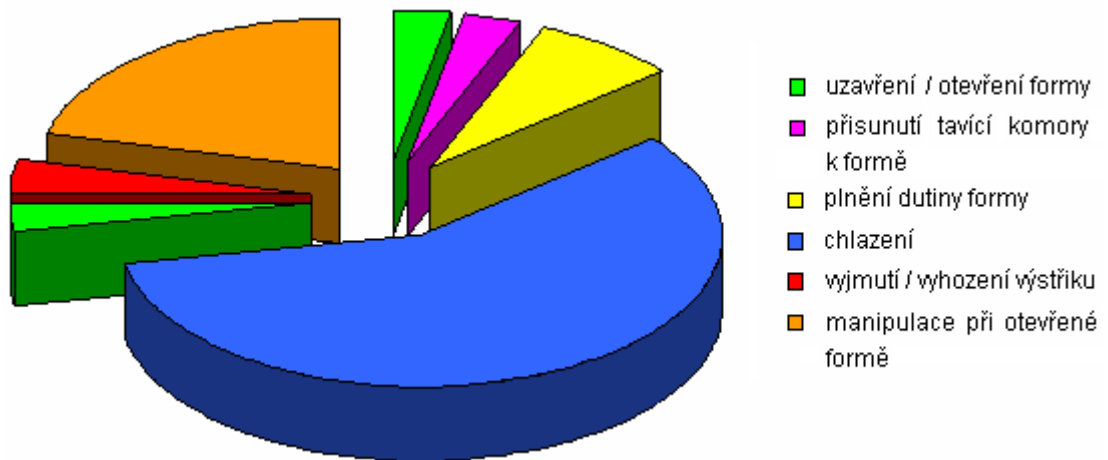


Obr. 2.3: Ukázky temperačního systému vstřikovacích forem /2/

2.1.2 Vstřikovací cyklus /1/, /2/

Vstřikovací cyklus můžeme z časového hlediska rozdělit do několika úseků (obr. 2.4), které znázorňují jednotlivé operace procesu vstřikování. Každý z úseků cyklu je odlišně časově náročný, jeho délka je závislá na materiálu a geometrii výstřiku a především na zvolených technologických podmínkách vstřikování. Snahou

je všechny operace co nejvíce zkrátit, z ekonomického hlediska je jasné, že čím kratší cyklus, tím více dílů či polotovarů je možnost vyrobit.



Obr. 2.4: Časový poměr jednotlivých operací při vstřikovacím cyklu

Uzavření a otevření formy tvoří většinou nejkratší část cyklu, je závislé na rychlosti pohybu formy a dráze, kterou musí forma urazit. Tato dráha je určena velikostí výstřiku, ke které musíme připočíst určitý prostor pro případnou manipulaci s výstřikem nebo formou. Rovněž čas pro **přisunutí tavicí komory k formě** je velice krátký. Orientačně je součet všech těchto časů jen několik málo vteřin. Pro dobu **plnění dutiny formy** je rozhodující rychlost vstřikování, která závisí na technologických podmínkách (teplota taveniny, vstřikovací tlak, teplota formy), konstrukci formy (vtoková soustava) a na samotném výstřiku (objem, tvar, druh plastu). Tato doba by měla být opět co nejkratší, limitující ovšem není jen ekonomické hledisko, ale i teplota taveniny (vstříknutá tavenina se při styku s formou ochlazuje a tím ztrácí svou tekutost, tudíž při delší době hrozí zatuhnutí a následně nedostříknutý výrobek, zmetek). Je zcela patrné, že nejdelší část cyklu je **doba chlazení**, která může trvat několik vteřin u tenkostěnných výrobků až po minutu a více u rozměrově objemných tlustostěnných součástí. Určujícím faktorem pro tutu dobu je tloušťka stěny výstřiku, druh vstřikovaného plastu, teplota taveniny, formy a teplota při vyjmutí výstřiku z formy. Současně s chlazením probíhají i další operace, přičemž nejdelší čas je určený pro dotlak, poté plastikaci nové dávky plastu a následně zbývá jen odsunutí tavicí komory od formy a prodleva v této odsunuté poloze. Doba pro **manipulaci** slouží k provedení nutných úkonů při otevřené formě, např. vyjmutí výstřiku a vtokového zbytku z formy manipulátorem nebo očištění formy, přípravu formy pro další vstřikovací cyklus apod.



2.2 Temperace vstřikovacích forem /5/, /6/

Temperace vstřikovací formy je řízené ochlazování nebo ohřev tvárníku a tvárnice účinkem temperačního média na požadovanou teplotu a udržení této teploty v požadované toleranci během celého procesu vstřikování.

Teplota formy má významný vliv na rychlost ochlazování výstřiku a protože je doba chlazení nejdelší částí vstřikovacího cyklu (viz. obr. 2.4), můžeme správnou volbou , konstrukcí, rozmístěním a naddimenzováním temperačního systému významně uspořit cenný čas a tím zkrátit celkovou dobu cyklu. Z ekonomického hlediska se tedy snažíme o co nejrychlejší odvod tepla z výstřiku. Na druhé straně oponuje kvalita dílu, pro kterou je výhodnější pomalejší ochlazování, aby odvod tepla z výstřiku byl rovnoměrný. Tím zajistíme rozměrovou přesnost výrobku bez vnitřního pnutí a povrchových vad. Kompromisem těchto hledisek je tedy rovnoměrné tuhnutí a chladnutí výstřiku v co nejkratším čase.

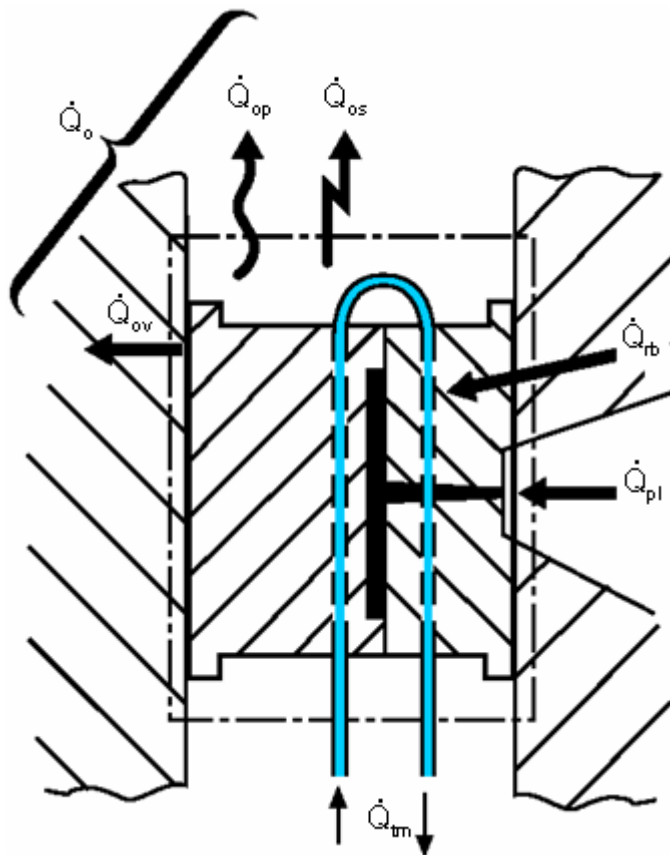
2.2.1 Tepelná bilance vstřikovací formy /6/, /9/

Jestliže chceme mít kvalitní výrobek a snížit cenu na minimum (a tudíž co nejvíce zkrátit dobu chlazení), je nutné znát a vhodně používat zákonitosti související s přenosem tepla uvnitř formy. Vstřikovací formu můžeme chápat jako termodynamický systém, ve kterém forma akumuluje teplo z tuhnoucí taveniny a toto teplo dále přestupuje do temperačního média chladicího systému, rámu stroje a do okolí. Při jednotlivých přestupech dochází k výměně tepla pomocí vedení, proudění a sálání.

Tepelná bilance (obr. 2.5) je názorné sestavení tepelných toků do formy vstupujících a z formy vystupujících. Ke stanovení těchto tepelných toků se vychází z několika předpokladů a zjednodušení:

- ✖ Vstřikovací forma tvoří uzavřený systém v tepelné rovnováze
- ✖ Tepelné toky ve formě i teploty jednotlivých částí formy jsou časově konstantní
- ✖ Uvažuje se sdílení tepla ve směru normály k teplosměnnému povrchu
- ✖ Zanedbává se kolísání teploty povrchu dutiny formy během vstřikovacího cyklu
- ✖ Za teplotu povrchu dutiny formy se uvažuje střední hodnota jejího teplotního maxima a minima během vstřikovacího cyklu
- ✖ Za teplotu temperačního média se považuje střední hodnota vstupní a výstupní teploty
- ✖ Hodnoty reologických a tepelných charakteristik se berou jako střední v daném intervalu

- × Tepelný tok přiváděný do formy se uvažuje jako kladný, tepelný tok odváděný z formy jako záporný



- Q_{pl} ... tepelný tok mezi plastem a formou [W]
- Q_{rb} ... tepelný tok mezi rozváděcím blokem vtokového systému a formou [W]
- Q_{tm} ... tepelný tok mezi formou a temperačním médiem [W]
- Q_o ... celkový tepelný tok mezi formou a okolím [W]
- Q_{os} ... tepelný tok předaný do okolí sáláním [W]
- Q_{op} ... tepelný tok předaný do okolí prouděním [W]
- Q_{ov} ... tepelný tok předaný do okolí vedením [W]

Obr.2.5: Tepelná bilance vstřikovací formy /6/

Výsledkem tepelné bilance je stav tepelné rovnováhy, kdy teplo přivedené plastem do formy je rovno teplu odvedenému, platí tedy vztah:

$$Q_{pl} + Q_{rb} + Q_{tm} + Q_o = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{kde} \quad Q_o = Q_{ov} + Q_{os} + Q_{op} \quad (2.2)$$

Jednotlivé tepelné toky se vypočítají díky výše uvedeným předpokladům a zjednodušením pomocí následujících vztahů:

Tepelný tok mezi plastem (taveninou) a formou - Q_{pl}

- je dán rozdílem entalpií plastu při teplotě zpracování a při střední teplotě vyjmutí z formy, vyjádřeno vztahem:



$$Q_{pl} = \frac{m_v \cdot \Delta h_p}{t_{chl}} \quad (2.3)$$

kde: m_v ... hmotnost výstřiku [kg]

Δh_p ... rozdíl měrných entalpií plastu při teplotě zpracování a při střední teplotě
vyjmutí z formy [J.kg⁻¹]

t_{chl} ... doba chlazení [s]

Tepelný tok mezi temperačním médiem a formou - Q_{tm}

- je uskutečněn pomocí přenosu tepla, které se skládá z vedení složenou rovinnou stěnou a následného přestupu do temperačního média. Výpočet tepelného toku mezi temperačním médiem a formou je vyjádřen vztahem:

$$Q_{tm} = k \cdot S \cdot (T_F - T_{tm}) \quad (2.4)$$

kde: k ... součinitel prostupu tepla [W.m⁻².K⁻¹]

S ... teplosměnný povrch [m²]

T_F ... teplota dutiny formy [°C], doporučenou teplotu znázorňuje tab.2.1

T_{tm} ... teplota temperovacího média [°C], viz.tab.2.1

Součinitel prostupu tepla k lze dle obr. 2.6 vyjádřit vztahem:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (2.5)$$

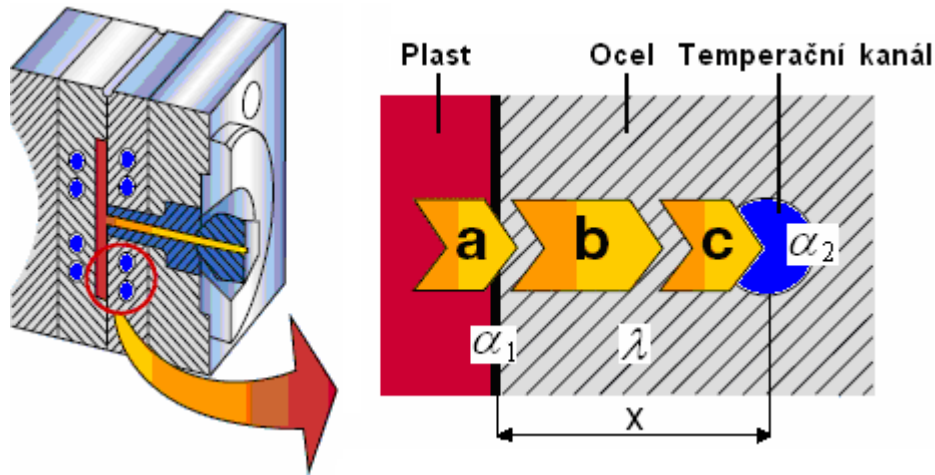
kde: α_1 ... součinitel přestupu tepla mezi taveninou a formou [W.m⁻².K⁻¹]

α_2 ... součinitel přestupu tepla mezi stěnou temperačního kanálu a
temperačním médiem [W.m⁻².K⁻¹]

λ ... součinitel tepelné vodivosti materiálu formy [W.m⁻¹.K⁻¹]

x ... vzdálenost mezi plastem a temperačním kanálem [m]

Nejjednodušším způsobem jak zvýšit temperační výkon je zvětšení součinitele prostupu tepla k . Toho lze (dle vzorce 2.5) dosáhnout změnou velikosti součinitele přestupu tepla mezi stěnou temperačního kanálu a temperačním médiem α_2 . Tato hodnota je funkcí Reynoldsova čísla a průměru temperovacího kanálu. To znamená, že je vhodné zajistit v kanálech turbulentní proudění temperační kapaliny, při kterém je vlivem proudění (konvekce) a vedení (kondukce) odvod tepla účinnější, než je tomu u laminárního proudění.



Obr. 2.6: Prostup tepla formou /23/

Tepelný tok mezi formou a okolím - Q_o

- se skládá ze tří tepelných toků, které popisují jednotlivé vztahy:
- × tepelný tok předaný z formy do okolí vedením Q_{OV} definuje *Fourierův zákon*:

$$Q_{OV} = S_V \cdot \lambda \cdot (T_{tm} - T_O) \quad (2.6)$$

kde: S_V ... povrch styčné plochy mezi formou a rámem stroje [m²]
 λ ... součinitel tepelné vodivosti [W.m⁻¹.K⁻¹]
 T_{tm} ... teplota temperačního média [K]
 T_O ... teplota okolí [K]

- × tepelný tok předaný z formy do okolí prouděním Q_{OP} definuje *Newtonův zákon*:

$$Q_{OP} = S_P \cdot \alpha_P \cdot (T_{tm} - T_O) \quad (2.7)$$

kde: S_P ... povrch styčné plochy mezi formou a okolím [m²]
 α_P ... součinitel přestupu tepla z formy do okolí [W.m⁻².K⁻¹]

- × tepelný tok předaný z formy do okolí sáláním Q_{OS} definuje *Stefan-Boltzmanův zákon*:

$$Q_{OS} = S_P \cdot e \cdot \xi_C \cdot \left[\left(\frac{T_{tm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_O}{100} \right)^4 \right] \quad (2.8)$$

kde: e ... emisivita povrchu
 ξ_C ... součinitel záření absolutně černého tělesa [W.m⁻².K⁻⁴]



Tab. 2.1: Doporučné teploty taveniny, formy a vyhození výrobku z formy pro
uvedené termoplasty /2/

Termoplast	Teplota taveniny [°C]	Teplota formy [°C]	Teplota vhodná pro vyhození výrobku z formy [°C]
ABS	190-250	50-85	80-100
PA 6	260-280	40-120	100
PA 6-GF	270-290	80-120	140
PA 66	275-295	80-100	100
PA 66-GF	280-300	80-120	130
PC	280-320	85-120	<140
PC-GF	310-330	80-130	<150
HDPE	180-270	20-60	-
LDPE	180-270	20-60	-
PP	170-280	20-100	-
PVC tvrzené	190-220	30-60	-
SAN	200-260	50-85	80-95
PEEK	380-430	160-220	-

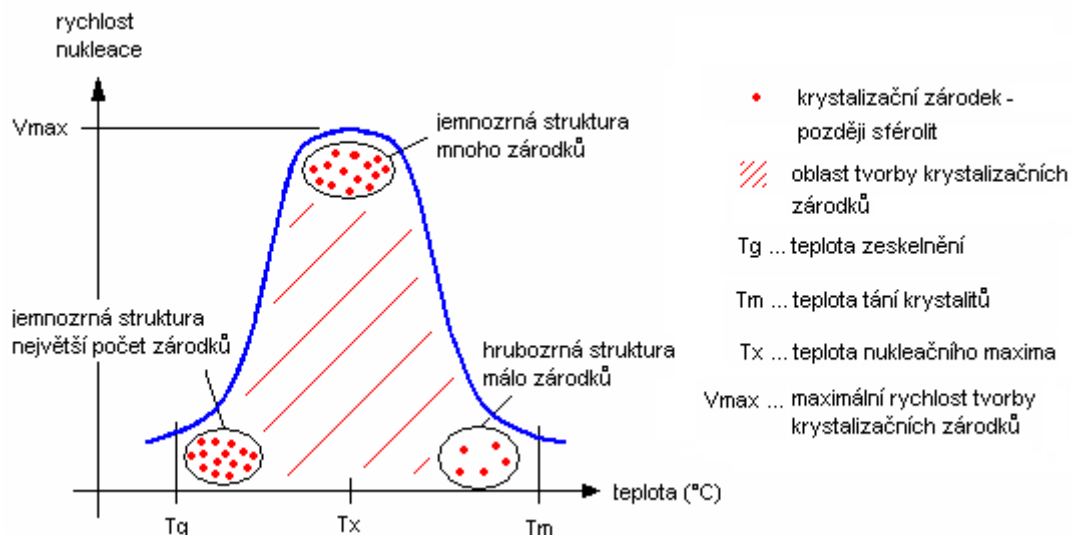
2.2.2 Vliv teploty formy na vlastnosti výstřiku /1/, /6/

Vzhled, vlastnosti a kvalita každého výrobku je dána souhrnem několika faktorů, které působí při procesu vstřikování navzájem. Hlavní roli ve vlastnostech budoucího výrobku hraje samozřejmě použitý druh materiálu a tvar (konstrukce) výrobku, ale neméně důležité jsou i technologické podmínky vstřikování, konstrukce formy ap. Jelikož během vstřikování probíhá tvarování součásti společně s tuhnutím, mohou technologické podmínky výrazně ovlivnit výslednou strukturu plastu, zejména pak jeho mechanické a fyzikální vlastnosti.

Rychlost a způsob odvodu tepla z výstřiku jsou jedny z hlavních technologických parametrů, které můžeme konstrukcí formy, především pak temperačního systému, významně ovlivnit kvalitu plastového výrobku. Zejména u velkoplošných a tvarově složitých součástí je důležité dbát na to, aby provedení a rozmístění temperačního systému zajišťovalo rovnoměrný odvod tepla z celého objemu výstřiku stejnou rychlostí. Rozdílná teplota v různých částech výstřiku by totiž výrazně zhoršila jeho vlastnosti, výrobek by obsahoval vnitřní pnutí a byl tvarově nestabilní.

2.2.2.1 Vliv teploty formy na morfologii výstřiku /1/, /11/, /14/

Morfologie, nebo-li nadmolekulární struktura plastů, má značný vliv na mechanické vlastnosti budoucího výrobku. Při tepelných procesech během fáze vstřikování, zejména při tuhnutí výstřiku, se vytvářejí reálné polykrystalické útvary, nazývané se u semikrystalických plastů sférolity. Tyto polykrystalické útvary vznikají z krystalizačních zárodků, které se tvoří mezi teplotou tání krystalitů T_m a teplotou zeskenění T_g (viz. obr. 2.7). Při pomalém ochlazování z teploty T_m vznikne pouze malé množství krystalizačních zárodků, ze kterých se později vytvoří sférolity. Růst sférolitů pokračuje až do okamžiku, kdy se jednotlivé útvary vzájemně dotknou. Pomalé ochlazování má tedy za následek malý počet velkých sférolitů a takto vytvořená struktura je hrubozrná. Postupným snižováním teploty se zvyšuje rychlost tvorby krystalizačních zárodků (zvyšuje se rychlost nukleace) až k teplotě nukleačního maxima (T_x), která odpovídá největší rychlosti tvorby zárodků, vzniklá struktura je jemnozrná (větší počet sférolitů o menší velikosti). Takto vzniklá struktura při teplotě T_x vykazuje největší míru uspořádanosti, podíl amorfní a semikrystalické fáze (stupeň krystalinity) je nejvýhodnější ve prospěch krystalické fáze. Zvýšení krystalické fáze na úkor amorfní (tzn. vyšší stupeň krystalinity) zlepšuje mechanické vlastnosti, roste pevnost, tvrdost, modul pružnosti a také tvarová stálost. Dochází ovšem k poklesu tažnosti a rázové houževnatosti.

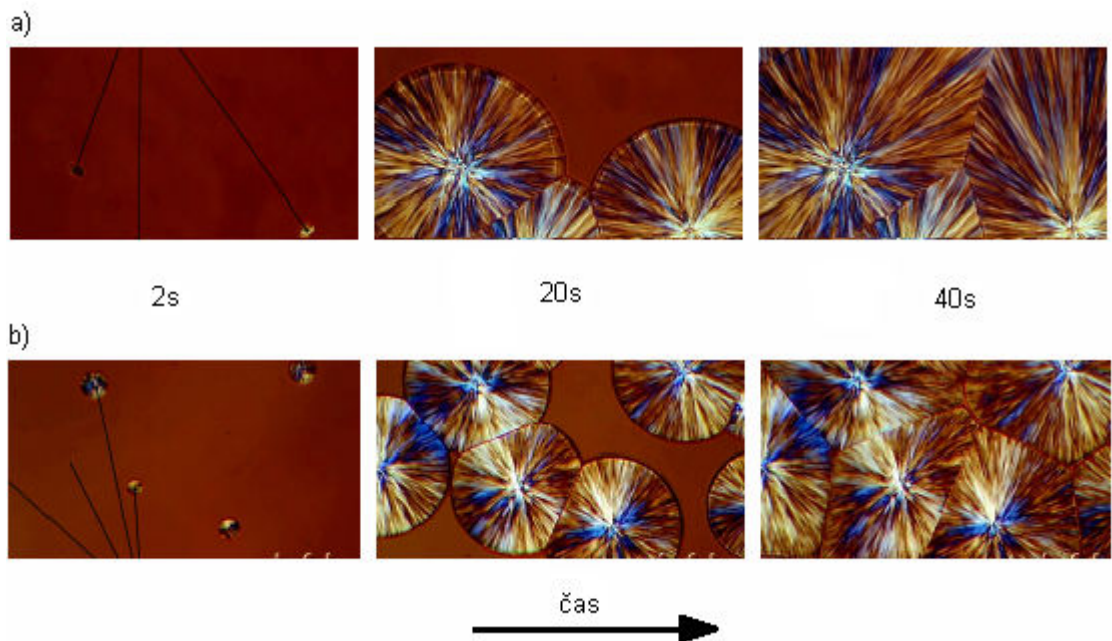


Obr. 2.7: Závislost rychlosti tvorby krystalizačních zárodků (nukleace) na teplotě u PP

Po dalším ochlazení z teploty T_x směrem k teplotě zeskenění T_g důsledkem snížení pohyblivosti makromolekul rychlost nukleace klesá. Těsně nad teplotou T_g se

sice vytvoří největší počet zárodků, ale vlivem nízké rychlosti nukleace se sférolity nestačí vytvořit.

Na obr. 2.8 je znázorněn rozdíl v rychlosti ochlazování výstřiku a jeho vliv na strukturu výstřiku. Jak již bylo řečeno, při pomalém ochlazení z teploty tání krystalitů se vytvoří méně zárodků, sférolity mají větší prostor pro růst a vzniklá struktura je hrubozrnná (viz. obr. 2.8 a). Rychlejší ochlazením výstřiku vytvoří více sférolitů o menší velikosti, struktura je jemnozrnná (viz. obr. 2.8 b) a z hlediska mechanických vlastností výhodnější (větší pevnost, tvrdost, modul pružnosti). Konečná morfologická struktura je tedy určena dobou, jakou bude mít polymer k dispozici ve fázi tuhnutí.



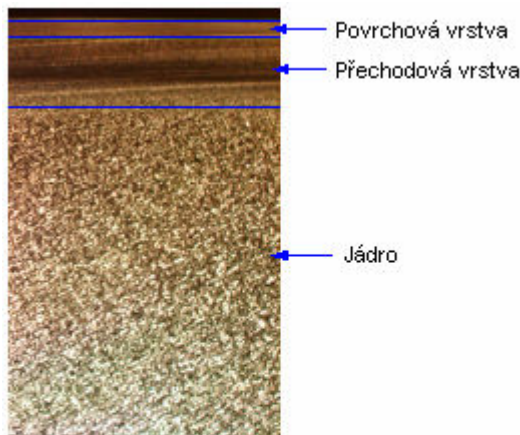
Obr. 2.8: Průběh krystalizace u neplněného polypropylenu v závislosti na rychlosti ochlazování /11/

a) pomalá rychlost ochlazování – hrubozrnná struktura

b) vyšší rychlost ochlazování – jemnozrnná struktura

Při tuhnutí výstřiku v reálných podmínkách dochází ke strukturním odlišnostem mezi povrchem výstřiku a jeho vnitřkem. Povrch výstřiku je ve styku se stěnou formy, která je chlazená temperačním systémem, a tuhne tudíž nejrychleji. Vlivem velmi rychlého ochlazení dojde na povrchu výstřiku ke vzniku velkého počtu krystalizačních zárodků, ovšem bez nárůstu sférolitů (z důvodu krátkého času pro růst sférolitů). Oproti tomu vnitřek polymeru, tzv. jádro, tuhne směrem ke středu výstřiku mnohem déle, utvoří se sice méně krystalizačních zárodků, avšak sférolity již mají dostatek času na růst, struktura je tedy lépe viditelná a odlišná od povrchové vrstvy.

Vlivem odlišných časů ztuhnutí výstřiku dochází tedy ke vzniku tří složek v průřezu výstřiku, jejichž tloušťka i struktura ovlivňuje mechanické vlastnosti výsledného výrobku. První složkou, která se nachází v bezprostředním kontaktu s



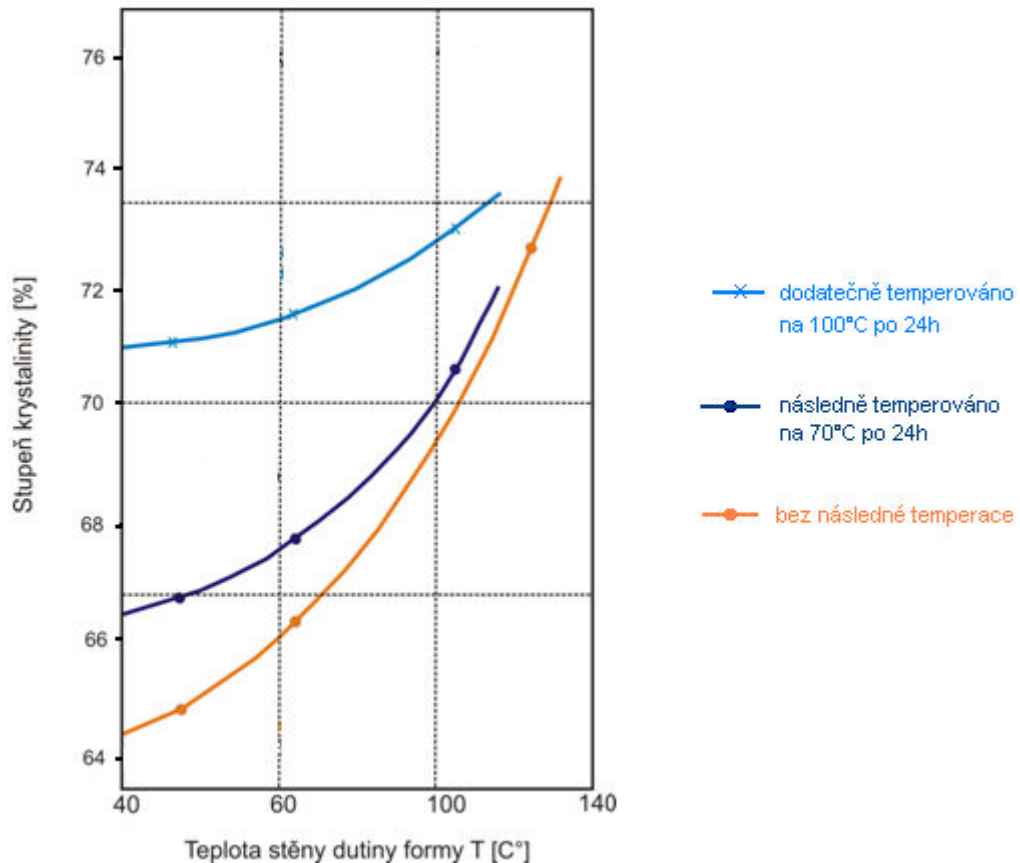
Obr.2.9: Charakteristické mikrostrukturní složky průřezu tloušťky výstřiku z polypropylénu /11/

temperovanou stěnou formy, je tzv. povrchová vrstva. Druhou strukturní složkou je tzv. jádro, které tuhne nejdéle díky menší intenzitě odvodu tepla než u povrchu výstřiku. Jakýsi přechod mezi těmito strukturními oblastmi tvoří tzv. přechodová vrstva, která je ovlivněna působením odlišného odvodu tepla z povrchu a středu výstřiku, tedy rozdílnou rychlostí tuhnutí. V technické praxi se používá pro hodnocení vlivu tloušťky jednotlivých vrstev celková povrchová vrstva, která je dána součtem vrstvy

povrchové a přechodové. Vliv velikosti tloušťky vrstev a jejich podoba na vlastnosti výrobku je odlišný podle druhu použitého materiálu (chemické složení, přítomnost aditiv) a také podle kinetických podmínek zpracování. Posouzení vlivu teploty na tvorbu těchto složek a jejich následný vliv na vlastnosti výstřiku je dále rozšířeno v experimentální části diplomové práce.

Způsob teploty a tudíž teplota formy je z výše uvedených zákonitostí rozhodujícím technologickým parametrem z hlediska morfologie plastů a konečné kvality výstřiku. Má-li tedy být vstřikovaný díl odolný vůči mechanickému namáhání, je třeba upravit teplotu formy tak, aby výrobek tuhl co nejrovnoměrněji a tím bylo dosaženo co nejvyššího stupně krystalinity a jemnozrnné struktury. V technické praxi, zejména v automobilovém průmyslu, se proto u semikrystalických plastů využívá přísadku anorganického minerálního plniva, nukleačního činidla - talku, který zvyšuje počet krystalizačních (nukleačních) zárodků a zjemňuje strukturu výstřiku.

Závislost stupně krystalinity na způsobu teploty je vysvětlen na obr. 2.10. Je patrné, že k dosažení vyššího stupně krystalinity je zapotřebí vyšší teplota formy, což je výhodné i z hlediska povrchových vlastností výstřiku (viz. kap. 2.2.5). S klesající teplotou dutiny formy prudce klesá i stupeň krystalinity, který má za následek pozdní krystalizaci (dokrystalizaci) a zvýšení dodatečného smrštění (kap. 2.2.4).



Obr. 2.10: Vliv teploty stěny dutiny formy a podmínek temperace na stupeň krystalinity u vstřikovaného dílu ze semikrystalického termoplastu /12/

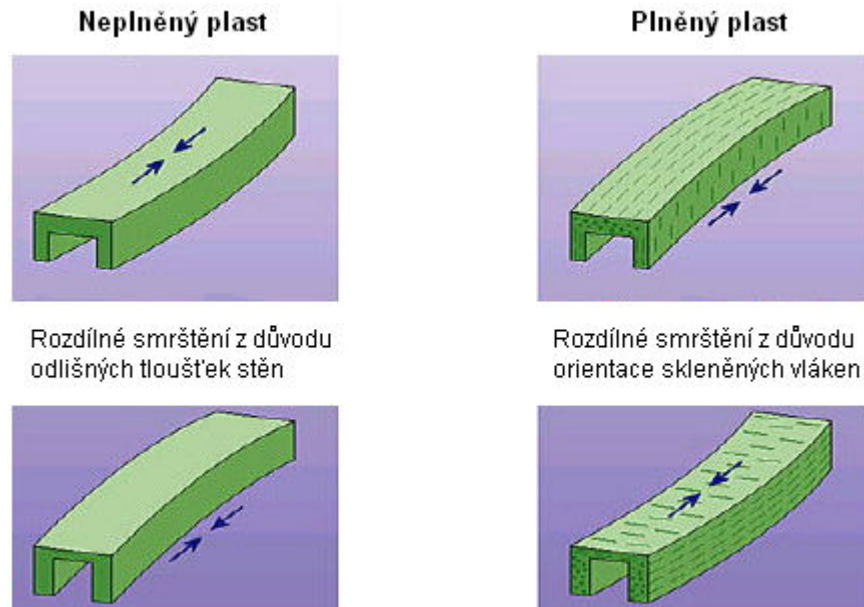
2.2.2.2 Vliv temperace formy na smrštění výstřiku /2/, /5/

Vlivem chlazení a tuhnutí dochází u výstřiku k rozměrovým změnám, které se obvykle nazývají smrštění. Smrštění je změna objemu výstřiku v důsledku tepelné stlačitelnosti a roztažnosti plastů. Velikost rozměrových změn u plastů je časově závislá, smrštění do 24h po vyjmutí z formy se nazývá výrobní, po delším časovém cyklu od vyjmutí výstřiku než 24h se mluví o smrštění dodatečném.

Výrobní smrštění závisí zejména na:

- × druhu použitého plastu a jeho nadmolekulární struktury (amorfní termoplasty mají všeobecně menší výrobní smrštění než krystalické)
- × tvaru výrobku a tloušťce stěny – u krystalických polymerů (čím je tloušťka stěny větší, výstřik chladne pomaleji a tím je stupeň krystalinity a tudíž i smrštění větší)
- × konstrukci formy (temperační systém, umístění vtokové soustavy) – vtoková soustava určuje charakter toku taveniny ve formě a tím i orientaci makromolekul, jejímž důsledkem je anizotropie smrštění (tzn. různé smrštění v podélném a příčném směru toku taveniny), viz. obr. 2.11

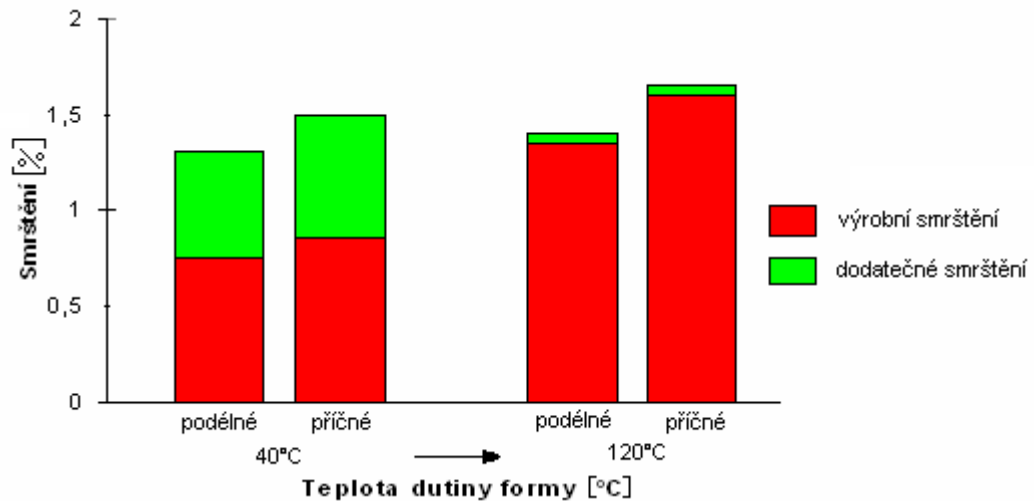
- * technologických podmínkách vstřikování - největší vliv má vstřikovací tlak a doba působení dotlaku. Platí, že vyšší vstřikovací tlak a prodloužení dotlaku výrobní smrštění snižují.



Obr. 2.11: Výrobní smrštění [2]

Dodatečné smrštění je u semikrystalických plastů způsobeno postupným uvolňováním vnitřního napětí (pnutí) ve spojení se sekundární krystalizací, nebo-li dokrystalizací. Změny rozměrů také velmi záleží na teplotě a době, po kterou je výstřik vystaven. S vyšší teplotou jsou makromolekuly pohyblivější a tím i změny rychlejší. Ve většině případů je hodnota dodatečného smrštění menší než hodnota smrštění výrobního.

Obr. 2.12 znázorňuje poměr mezi výrobním a dodatečným smrštěním u materiálu polyamid 6 v závislosti na teplotě povrchu dutiny formy. Je zřejmé, že nižší teplota formy (v daném případě 40 °C) při vstřikování a následné rychlé ochlazení má za důsledek kromě nízkého stupně krystalizace také nižší hodnotu výrobního smrštění, oproti tomu dodatečné smrštění je značně veliké. Zcela zásadně se mění poměr mezi výrobním a dodatečným smrštěním při vyšší teplotě dutiny formy (zde 120 °C), kdy je sice výsledná hodnota smrštění obdobná jako u nižší teploty formy, ale je prakticky vymazán efekt dodatečného smrštění, neboť je tato hodnota téměř zanedbatelná. Pro výpočet rozměrů dutiny formy je určující hodnota výrobního smrštění, velikost dodatečného s jistotou nelze předem stanovit. Z tohoto hlediska je výhodnější ohřát dutinu formy na vyšší teplotu, což má ovšem za následek prodloužení vstřikovacího cyklu.



Obr. 2.12: Poměr velikosti výrobního a dodatečného smrštění v závislosti na teplotě formy

2.2.2.3 Vliv teploty formy na povrch výstřiku

Na jakost povrchu výrobku vyráběného vstřikováním má vliv mnoho faktorů. Z hlediska zaměření diplomové práce na temperaci forem je uveden pouze vliv teploty formy. Při porovnání vzorků stejného materiálu (zde uveden na obr. 2.13 amorfnní polymer ABS) s rozdílnou teplotou formy při výrobě je patrný menší lesk u vzorku, který byl vstřikován při vyšší teplotě formy. Vyšší teplota formy totiž umožní větší zastoupení jemnozrnné struktury ve vzorku, která lépe a rovnoměrněji pohlcuje světelné paprsky, tudíž se povrch jeví jako matný. Naopak nižší teplota formy neumožní vznik jemnozrnné struktury, struktura je hrubozrnná a světelné paprsky se odrážejí nerovnoměrně různými směry podle členitosti povrchu. Výsledný povrch polymeru se jeví jako více lesklý.



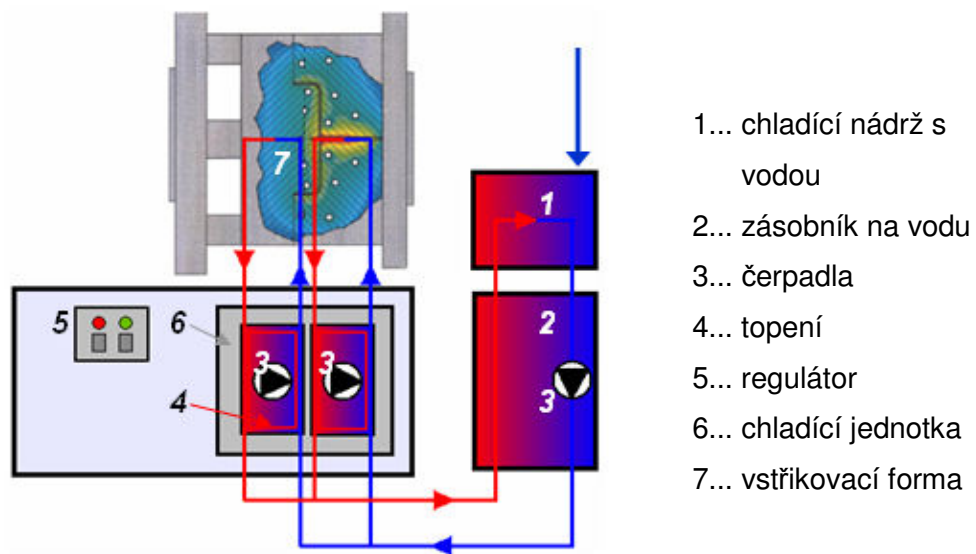
Obr. 2.13: Vliv teploty formy na jakost povrchu u materiálu Novodur (ABS) / 10/

2.3 Konvenční způsoby temperování /5/, /9/

Současně s rostoucí technickou vyspělostí se v plastikářském průmyslu objevuje stále více metod a způsobů temperace tvarových dutin vstřikovacích forem. Některé metody jsou v průmyslové praxi již běžně používány, jiné si teprve své místo na plastikářském slunci hledají a jsou více či méně ve fázích výzkumu a vývoje.

V praxi nejběžnější způsob jak odvádět teplo ze vstřikovací formy je stále temperace s kapalným teplotním médiem proudícím v kanálech, jež se řadí mezi konvenční metody temperace. Temperační agregát s řídicí jednotkou, temperační kanály procházející vstřikovací formou i cirkulující teplotní médium, to jsou hlavní části systému, pro které je nutné zajistit předepsané specifické podmínky, aby bylo dosaženo optimální produkce vstřikovaných dílů s nejlepší možnou kvalitou.

Temperační jednotka (obr. 2.14) zajišťuje rychlý ohřev formy na požadovanou teplotu a udržení na této teplotě (chlazením nebo ohřevem) při minimálních výkyvech během výroby. Standardně je temperační jednotka vybavena kompresorem, kondenzátorem, čerpadlem, výparníkem a zásobníkem na vodu. Obvykle je spojena mimo vstřikovacího lisu i s vodovodním a kanalizačním systémem. Správné nastavení a regulaci teplot zajišťuje řídicí jednotka (je také součástí temperační jednotky), která hlídá rovněž hladinu teplotního média. Může mít přímé nebo nepřímé řízení teploty. Bezpečnost, spolehlivost a jednoduchá obsluha jsou dalšími důležitými aspekty, na které je mimo technické a výkonové stránky při výběru temperační jednotky důležité se zaměřit.



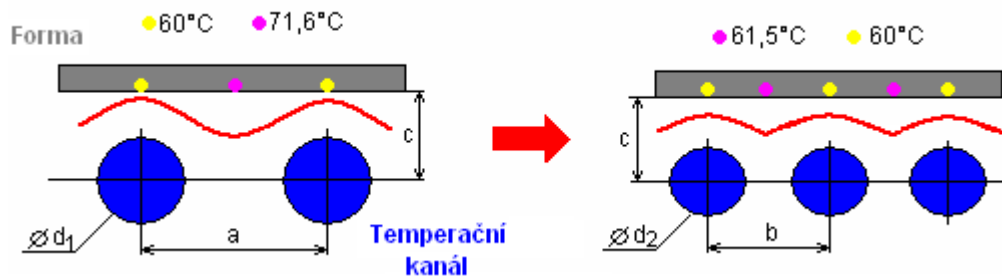
Obr. 2.14: Temperační jednotka /5/

Temperační médium je voleno dle svých tepelných vlastností, zejména stálosti za vyšších teplot. V současnosti je stále nejvíce používaným teponosným médiem voda (zejména díky snadné dostupnosti a nízké ceně, ekologické nezávadnosti, nehořlavosti), která je vhodná pro chladicí okruhy pracující při nižších teplotách. Pracovní teplota se u vody pohybuje do 90 °C. Pro vyšší teploty a chladicí výkony se používají minerální nebo syntetické oleje, u kterých se oběžná teplota může pohybovat až do 150 °C. Další možností jsou různé roztoky glykolů.

Temperační kanály mohou být ve formě zhotoveny různého průřezu. Nejčastěji se jedná o průřez kruhový, mezikruhový, čtvercový a obdélníkový. Pro zvětšení přestupu tepla mezi stěnou kanálu a teponosným médiem, je potřeba docílit turbulentního proudění uvnitř kanálu. Toho lze dosáhnout hrubým opracováním vnitřní stěny kanálu, např. vrtáním. Průtoková rychlost v kanálech se pohybuje v rozmezí 0,5 - 4 m/s.

Při návrhu temperačního systému, potažmo temperačních kanálů, musíme dodržovat tyto požadavky na konstrukci a řešení systému:

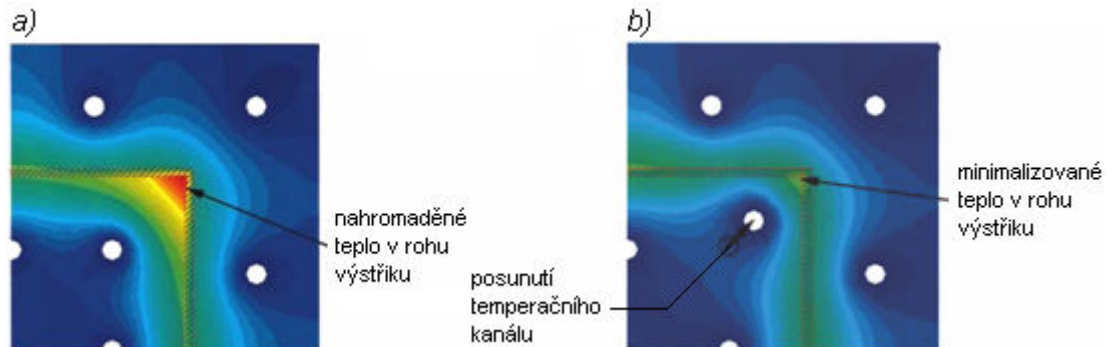
- ✱ Kanály je nutné konstruovat tak, aby bylo chladicí médium přiváděno do nejteplejšího místa ve formě (zpravidla je jím ústí vtoku), aby se snížil teplotní rozdíl ve směru toku.
- ✱ Je vhodné umístit kanály co nejbližší k tvarové dutině formy, avšak nesmí dojít k narušení celistvosti stěny formy.
- ✱ Velikost průtočného průřezu nesmí narušovat pevnost součásti.
- ✱ Vzdálenost kanálu od líce formy závisí na velikosti tlaku a je omezena přípustným kolísáním teploty
- ✱ Kanály umisťovat rovnoměrně kolem celé tvarové dutiny formy, vzdálenost od povrchu je ve všech místech shodná.



Obr. 2.15: Zvýšení rovnoměrného odvodu tepla přidáním temperačního kanálu

Z hlediska rovnoměrného rozložení teplotních polí ve výstřiku je vhodné umístit k tvarové dutině formy větší počet kanálů o menším průřezu (obr. 2.15), než-li

naopak. V místech, jako jsou např. kouty výstřiků (větší množství materiálu) nebo okolí vtokového kanálu, je zapotřebí zvýšit účinnost chlazení. Odlišná rychlost chladnutí mezi dvěma místy na výstřiku by totiž vedla k neregulárním časům ztuhnutí a měla vliv na tvorbu smrštění (deformace v rozích) a vnitřního pnutí. Účinnost chlazení lze zvýšit přiblížením kanálu do rohu (obr. 2.16), zmenšením rozteče mezi kanály nebo přidáním zvláštní větve chlazení, kde můžeme zvýšit rychlost proudění temperačního média, snížit teplotu média, zvětšit průměr kanálu apod.



Obr. 2.16: Zvýšení účinnosti chlazení v rohu výstřiku přiblížením temperačního kanálu /4/:

a) neoptimalizováno

b) optimalizováno posunutím temperačního kanálu do rohu výstřiku

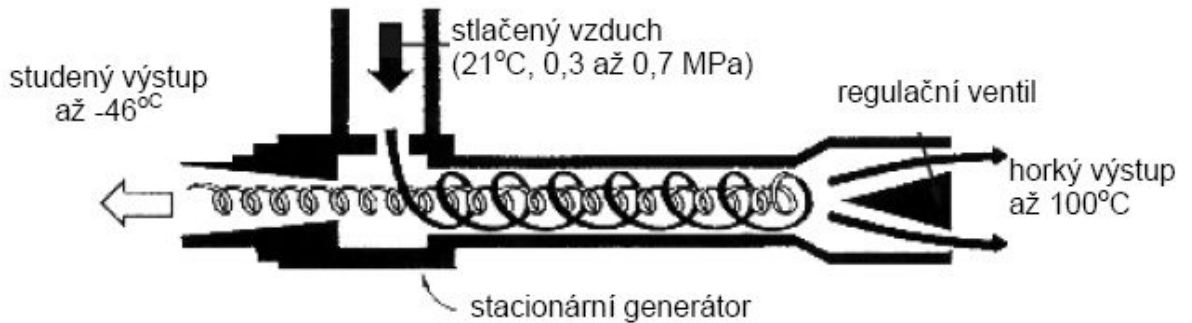
Temperační okruh vytvořený temperačními kanály s teplotonosným cirkulujícím médiem se zapojuje nejčastěji do série pro lepší změnu toku média a vytvoření potřebného turbulentního proudění. Při paralelním zapojení není zaručena jistota rovnoměrného průtoku teplotonosného média v kanálech.

2.4 Nekonenční způsoby temperování

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.2.6, hledají se stále nové, lepší, účinnější a technicky dokonalejší způsoby odvodu tepla z formy a výstřiku. Některé způsoby temperace se již „zabydlely“ v procesu vstřikování plastů, jiné jsou teprve své uplatnění hledají nebo jsou ve fázích výzkumu. Tyto nové, alternativní (nekonvenční) způsoby temperace mohou být platným pomocníkem běžného temperovacího systému s teplotonosným médiem proudícím v temperačních kanálech nebo jej zcela nahradit. Mezi nekonvenční způsoby temperace řadíme temperaci stlačeným vzduchem pomocí Ranque – Hilsch vírové trubice, temperaci tepelnou trubicí, vložkování tepelně vysoce vodivými materiály, temperační systém Contura nebo technologie TOOLVAC®, která využívá porézní ocele a kapalného CO₂.

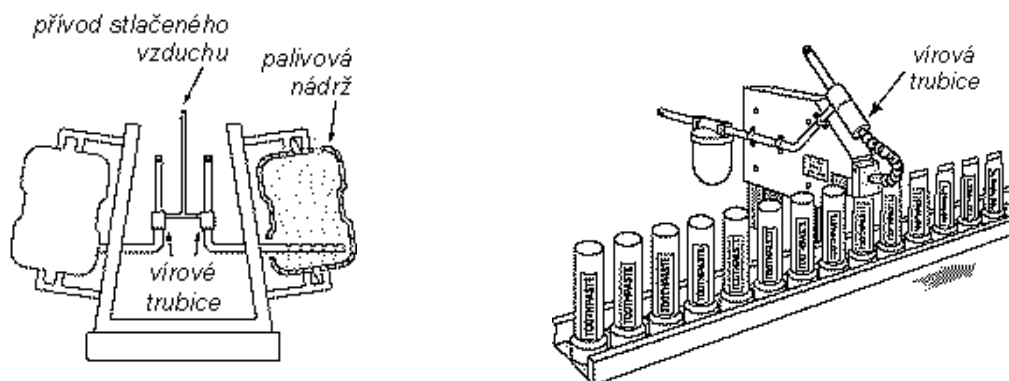
2.4.1 Ranque – Hilsch vírová trubice /4/, /5/, /7/

Vírová trubice je zařízení, které upravuje (nebo-li separuje) obyčejný stlačený vzduch současně do dvou vzduchových proudů, přičemž jeden je studený a druhý horký (obr. 2.17). Bez jakékoliv elektrické energie mohou vírové trubice chladit v obrovském teplotním rozsahu od -46°C až do +100°C za použití filtrovaného stlačeného vzduchu o teplotě 21 °C a tlaku 0,3 - 0,7 MPa.



Obr. 2.17: Princip Ranque - Hilsch vírové trubice /4/

Mezi výhody vírové trubice oproti konvenčním metodám temperace vstřikovacích forem patří zejména okamžitý náběh chlazení a ohřívání a to do velmi nízkých nebo velmi vysokých teplot, vysoká spolehlivost, jednoduchá údržba, možnost použití v provozech s nebezpečím výbuchu, ekologická a energetická nenáročnost a v neposlední řadě i příznivá cena. I přes svou krátkou existenci jsou vírové trubice nasazeny v mnoha průmyslových aplikacích, např. jako chladicí zařízení při vyfukování palivových nádrží, kdy použití Ranque-Hilsch vírové trubice zkrátilo dobu chlazení o 33 % nebo u chlazení svařovacích čelistí při ultrazvukovém svařování.



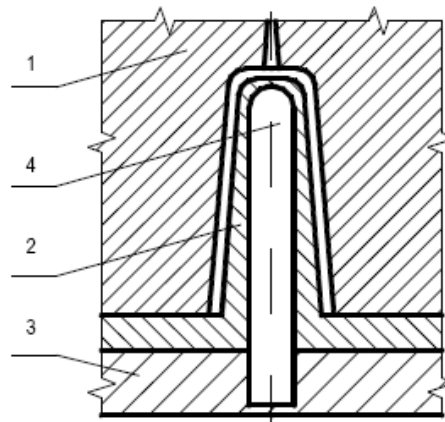
Obr. 2.18: Příklady použití Ranque-Hilsch vírové trubice: /7/

- a) chlazení palivových nádrží při vyfukování
- b) chlazení svařovacích čelistí při ultrazvukovém svařování

2.4.2 Vložkování forem vysoce tepelně vodivými materiály /7/

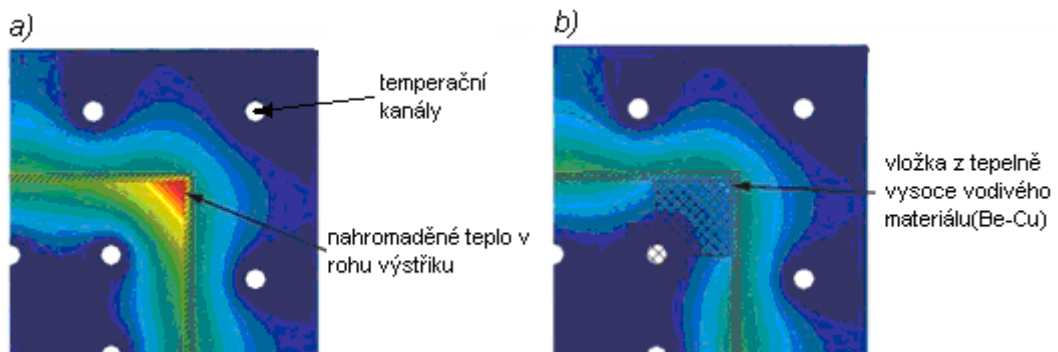
Materiály na bázi slitin berilia, cobaltu nebo mědi (např. Ampcoloy, Moldmax) mají mnohem větší tepelnou vodivost než běžné ocele, ze kterých se vyrábí tvářecí části formy. Použitím vložek z těchto materiálů v bezprostřední blízkosti dutiny formy lze docílit vyššího odvodu tepla ve vstřikovací formě při rovnoměrném teplotním zatížení výrobku v celém objemu. Ve spojení s cirkulující vodou v temperačních kanálech dojde ke zmenšení rozdílu teplot ve formě, k lepšímu zatečení taveniny do zadních míst výstřiku bez výskytu studených spojů a také ke snížení doby cyklu.

Vložek se používá u tvarově složitých členitých výrobků, které se jen obtížně dají temperovat, např. výstupky o malé tloušťce nebo dlouhé tenké tvárníky (jaderníky, obr. 2.19). Lze použít i u výrobků s lokální teplotní nehomogenitou.



Obr. 2.19: Chlazení jádra pomocí tepelné vložky /7/: 1.tvárnice, 2.tvárník, 3.základová deska, 4.vložka z vysoce tepelně vodivého materiálu

Obr. 2.20 představuje způsob optimalizace temperačního systému a vliv vložky z vysoce tepelně vodivého materiálu, v daném případě slitiny berilia s mědí.



Obr. 2.20: Optimalizace odvodu tepla v rohu výstřiku /4/

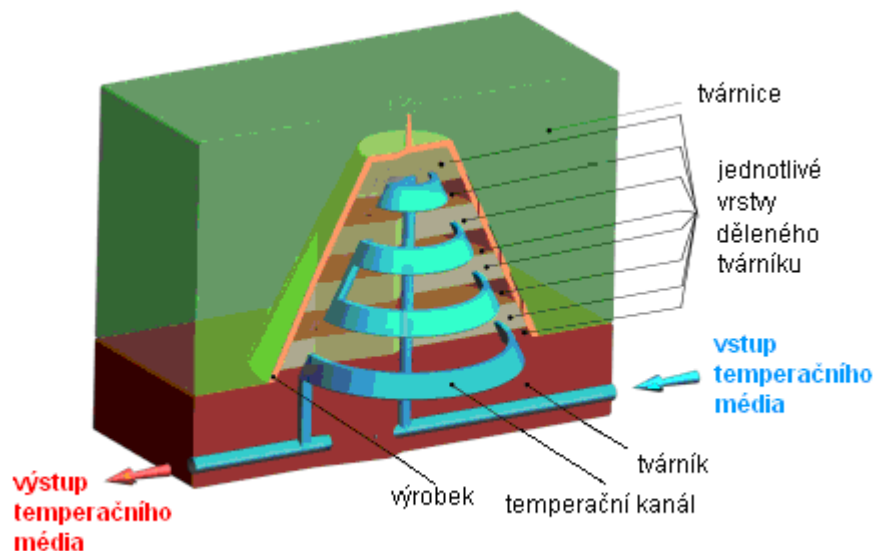
a) neoptimalizováno

b) optimalizováno kombinací temp. kanálu a vložky z Be-Cu

2.4.3 Temperační systém CONTURA /4/, /7/, /14/

Rychlý a rovnoměrný odvod tepla z formy výrazně snižuje dobu pracovního cyklu. U temperačního systému s obchodním názvem CONTURA byla doba chlazení zkrácena až o 30 % v závislosti na konstrukčním řešení výrobku.

Tohoto významného uspoření času bylo dosaženo konstrukcí chladicího systému, kde temperační kanály kopírují obrys tvarové části dutiny vstřikovací formy (obr. 2.21). Tvárník je rozdělen do dvou a více vrstev, přičemž jednotlivé části (vrstvy) tvárníku lze na hlavních plochách snáze obrábět a tím vhodně vytvářet temperační kanály, které se lépe přizpůsobí obrysu tvarové části dutiny formy. Jednotlivé vrstvy tvárníku se skládají na sebe a spojují speciální technikou pájením natvrdo v podtlaku. Tím vznikne vzduchotěsný spoj a tvárník zůstane homogenní. Při spojení touto speciální technikou nedochází k uvolňování nadměrného množství plynů, naopak dochází k odplynění spojovacího materiálu a tím i zlepšení jakosti spoje.



Obr. 2.21: Temperační systém CONTURA /14/

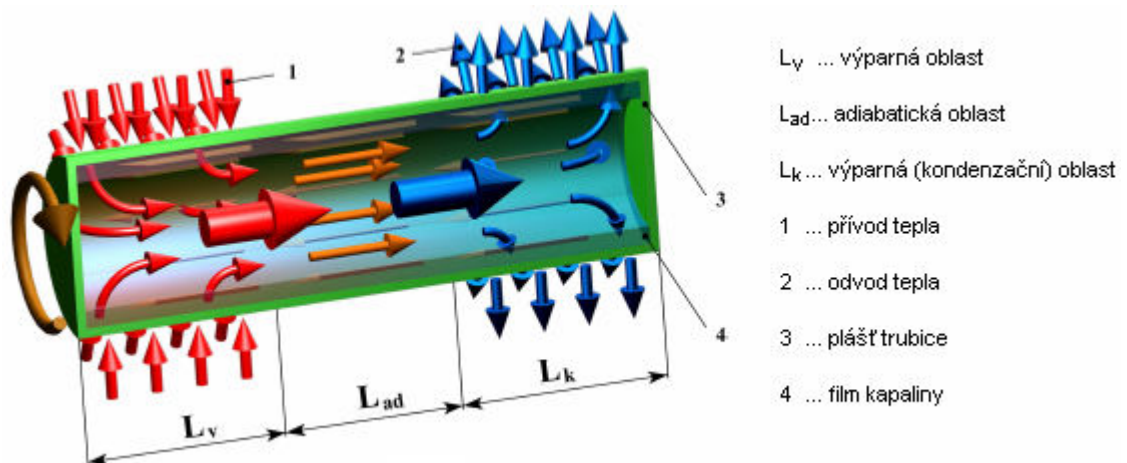
Jak již bylo řečeno v úvodu, hlavní výhodou tohoto nekonvenčního způsobu temperace je rychlý a rovnoměrný odvod tepla z formy díky temperačním kanálům kopírující obrys výstřiku. Rovněž rozložení teplotního pole je díky tvarování chladicího systému výrazně rovnoměrnější než u běžné temperace kanály s teponosným médiem, což je důležité pro zlepšení kvality budoucího výrobku. Jedinou nevýhodou mohou být vyšší náklady spojené se složitostí výroby formy.

2.4.4 Temperace tepelnou trubicí /8/, /14/

Již v roce 1942 si R. S. Gaugler nechal patentovat vynález, tepelnou trubicí, kterou použil při chlazení ledových boxů. V současnosti se tepelná trubice hojně

používá v průmyslu k chlazení a temperování zejména díky své obrovské tepelné vodivosti, která je až 1000x větší než u měděné tyče stejných rozměrů. K temperování vstřikovacích forem jsou používány nejvíce u tvarově složitých výrobků, kde by výroba a dimenzování temperačních kanálů byla značně složitá a nákladná.

Konstrukčně se jedná o uzavřený kovový válec nebo kužel o průměru 3 až 16 mm, který je naplněn pracovní látkou (čpavek, freon, voda, metylalkohol). Princip temperace tepelnou trubicí (obr. 2.22) je založen na přenosu tepla z jednoho místa trubice na druhý pomocí odpařování a kondenzace pracovní látky. Při tuhnutí výstřiku uvolněné teplo přechází do jedné části trubice (výparná oblast), kterou tím zahřívá až na teplotu, kdy se pracovní látka uvnitř začne odpařovat. Tím vzroste tlak a na základě rozdílných tlaků na obou koncích trubice se pára dává do pohybu. V místě výparníku je tlak vyšší, na druhém konci trubice, která ještě není zahřívána tuhnoucí taveninou, je teplota i tlak nižší. Pára tedy proudí přes transportní (adiabatickou) oblast do chladnější části trubice, kde kondenzuje a latentní teplo je tak odvedeno do okolí. Teplota média v adiabatické části nám tedy určuje pracovní teplotu trubice. Vlivem kapilárních sil v porézním materiálu vnitřního pláště trubice je zajištěn návrat kondenzátu zpět do výparné oblasti a celý cyklus se může opakovat.



Obr. 2.22: Princip tepelné trubice /14/

Následující tabulka charakterizuje pracovní látky používané jako temperační médium a vhodné materiály pro konstrukci stěny tepelné trubice. Čím větší je transportní činitel, tím lepší je cirkulace v trubici.



Tab. 2.2: Pracovní látky používané v tepelných trubicích a jejich charakteristika /8/

Pracovní látka	Pracovní teploty [°C]	Transportní činitel	Vhodný konstrukční materiál
dusík	-200 ÷ -170	9×10^6	Nerezová ocel
čpavek	-70 ÷ 50	1×10^8	Nerezová ocel, nikl, hliník
freon 12	-60 ÷ 40	1×10^7	Nerezová ocel, měď
methanol	-30 ÷ 100	5×10^5	Měď
voda	10 ÷ 200	5×10^8	Měď, Nikl
rtuť	190 ÷ 500	9×10^9	Nerezová ocel
draslík	400 ÷ 800	5×10^8	Nerezová ocel
sodík	500 ÷ 900	2×10^9	Nerezová ocel
lithium	900 ÷ 1500	8×10^9	Tantal, TZM

2.5 Temperace forem pomocí oxidu uhličitého (CO₂)

Oxid uhličitý (chemický vzorec CO₂) se v současné době využívá k procesu chlazení vstřikovacích forem ve dvou aplikacích:

1. Aplikace pro TOOLVAC® oceli
2. Aplikace u konvenční nástrojové oceli (bodové chlazení)

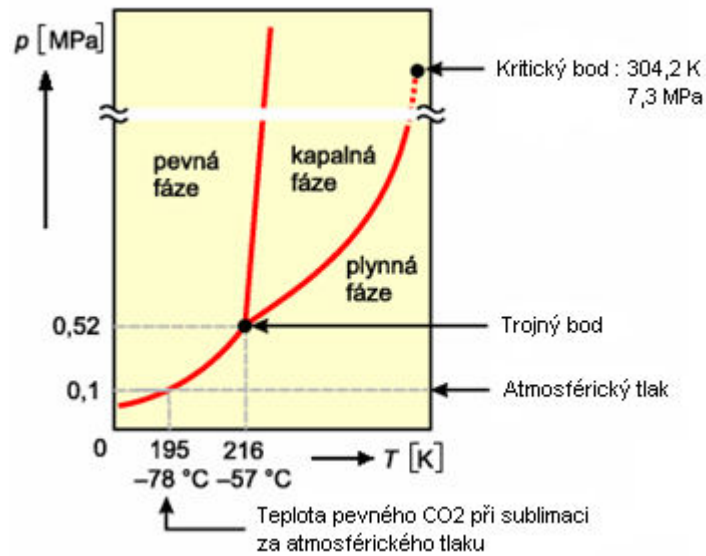
2.5.1 Charakteristika oxidu uhličitého /15/, /16/, /7/

Již v 17.století zjistil vlámský chemik Jan Baptist van Helmont, že při spalování dřevěného uhlí v uzavřené nádobě je hmotnost zbylého popele menší, než hmotnost původního uhlí. Vysvětlil to tím, že část uhlí se přeměnila na neviditelnou substanci, kterou nazval *plyn spiritus sylvestre*. Oxid uhličitý byl tak popsán jako chemická sloučenina a zároveň první plyn odlišný od vzduchu. Později, v polovině 18.století, zkoumal jeho vlastnosti skotský lékař Joseph Black. Mimo jiné zjistil, že se tento plyn uvolňuje v procesu kvašení (fermentace) a oproti normálnímu vzduchu je asi 1,5x těžší a nepodporuje proces hoření.

Oxid uhličitý je popsán chemickým vzorcem CO₂. Je to bezbarvý plyn, nehořlavý, bez chuti a zápachu. Při nadýchání ve větším množství působí štiplavě na sliznicích a vytváří kyselou chuť. Je to způsobeno reakcí se slinami za vzniku slabého roztoku kyseliny uhličité. Je přibližně 1,5 x těžší než vzduch, proto se také hromadí ve spodních částech uzavřených prostorů (jeskyně, kvasné sklepy).

CO₂ se může vyskytovat ve všech třech skupenstvích. Při ochlazení na přibližně -78 °C za atmosférického tlaku mění CO₂ své skupenství ze stavu plynného na tuhé za vzniku bílé tuhé látky, nazývané suchý led. Jako kapalina může existovat jen za tlaku vyššího než přibližně 500 kPa, tzn. zhruba pětinasobku atmosférického

tlaku. Děje a změny skupenství jsou znázorněny ve fázovém diagramu pro CO₂ na obr. 2.23.



Obr. 2.23: Fázový diagram výskytu CO₂ /15/

2.5.2 Kapalný oxid uhličitý pro technické aplikace /7/, /19/, /20/

CO₂ ve fázi kapaliny se vyskytuje pouze při vyšším tlaku než 0,5 Mpa (viz. obr. 2.23). Pro technické aplikace, v průmyslu (hlavně potravinářském), se nejčastěji používá kapalný CO₂ jako chladivo nebo k sycení nápojů, v chemickém a farmaceutickém průmyslu jako rozpouštědlo pro řadu organických látek.

Získat kapalný CO₂ pro technické aplikace jako chladivo je možné z plynných směsí obsahujících uhlík nebo jako vedlejší produkt z chemických reakcí. Avšak standardní metodou pro zpracování CO₂ je kvašení. V první fázi musí plynná směs obsahující CO₂ projít tzv. pračkou, aby se zbavila pevných částic a těžších uhlovodíků, následně je komprimována a vedena přes čistící zařízení. Pomocí aktivního uhlí a oxidu hlinitého dojde k odstranění nežádoucích příměsí a vodní páry. Po tomto procesu čištění je získán čistý oxid uhličitý, avšak v plynném skupenství. Následně je čistý CO₂ veden potrubím až ke zkapalňovači. V tomto chladicím zařízení dojde k sublimaci plynu při teplotě -75,5 °C, plynné skupenství se mění na kapalné. Takto zkapalněný CO₂ musí být skladován v zásobnících nebo tlakových lahvích. V současné době se používají ke skladování kapalného CO₂ i tzv. minitanky, které jsou vhodné pro přepravu a skladování kryogenních plynů.

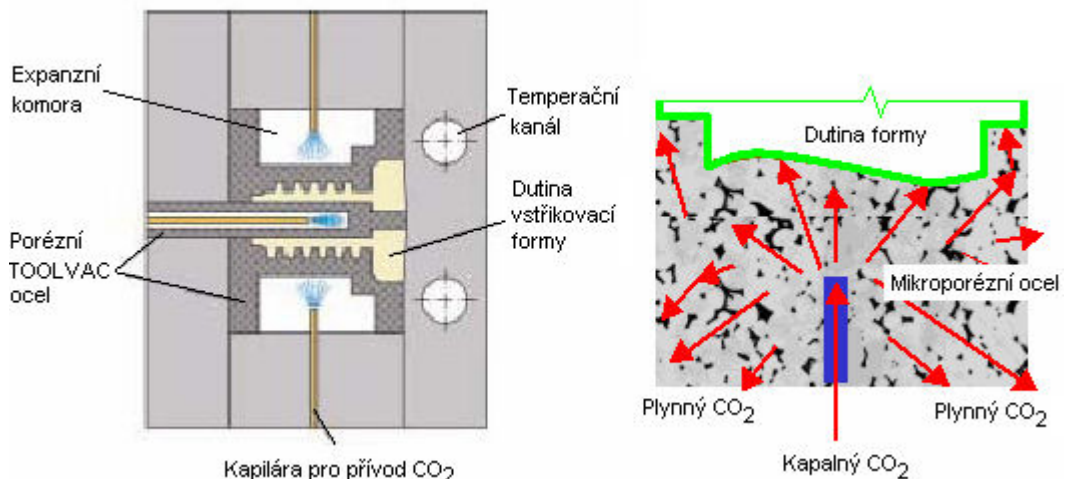
2.6 Aplikace CO₂ při technologii TOOLVAC® /21/, /22/

Technologie TOOLVAC® je nový nekonvenční způsob temperace vstřikovacích forem vyvinutý německou firmou Foboha Werkzeugbau GmbH. ve

spolupráci se švédskou firmou AGA Gas AB. Řeší dva zásadní a mnohdy opomíjené problémy vznikající při procesu vstřikování související s jakostí výrobku, kterými jsou rovnoměrný odvod tepla z nástroje a odvzdušnění (odplynění) formy.

Odvod tepla z formy u této technologie spočívá v odpařování kapalného CO₂ přiváděného v kapilárách do speciální mikroporézní oceli (např. ocel TVBX 03), ze které jsou vyrobeny tvarové části formy. Kapalným CO₂ je tedy přiveden z tlakových zásobníků do formy pomocí kapilár, které ústí v expanzních komorách (obr. 2.24). Na základě poklesu tlaku (jak bylo vysvětleno v kap. 2.3.1, kapalným CO₂ existuje pouze při tlaku větším než přibližně 500 kPa) mezi zásobníkem a formou, se kapalným CO₂ začne vypařovat a měnit své skupenství na plynné. Plyn snadno projde skrz porézní ocel až k povrchové vrstvě tvarové dutiny formy. Z fyzikálního vztahu mezi teplotou a tlakem je zřejmé, že objem CO₂ je v plynné fázi mnohem větší než v kapalně a v důsledku těchto jevů se začne pohlcovat tepelná energie vycházející z výstřiku. Na rozdíl od temperačních kanálů s proudícím médiem, pórovitá ocel spolu s rozptýleným CO₂ obklopujícím výstřik dokáže udržet teplotu na konstantní hodnotě v celé tvarové dutině formy.

Kapalným CO₂ je přiváděn ze zásobníku do formy jen v určitých časových impulsích tak, aby bylo dosaženo žádané teploty nástroje. Celý proces je sledován řídicí a kontrolní jednotkou umístěnou ve formě, která v případě uzavřeného okruhu vrací plynný CO₂ zpět k novému zkapalnění.

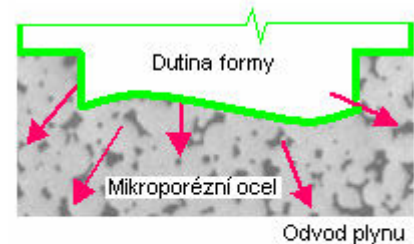


Obr. 2.24: Schéma chlazení TOOLVAC® technologií (vlevo) /19/, bližší pohled na děje uvnitř formy a rozptýlení plynu v pórovité oceli (vpravo) /21/

Speciální mikroporézní ocel, ze které jsou vyrobeny tvarové části formy, se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi, obzvláště vysokou a rovnoměrnou tvrdostí. Avšak při konstrukčním návrhu jader je nutné zohlednit skutečnost, že

výroba těchto ocelí je prováděna práškovou metalurgií a následným procesem spékání se výrazně sníží pevnost v ohybu oproti běžným cementačním ocelím. Z tohoto pevnostního hlediska není vhodná tato technologie pro temperaci dlouhých tvárnků. Vzhledem ke struktuře mikroporézní oceli nedosahuje povrch vstřikovaného dílu žádaného lesku, proto se utěšňují póry mechanicky (obráběním) nebo pomocí aditiv u výrobků tam, kde je zapotřebí dokonalého vzhledu.

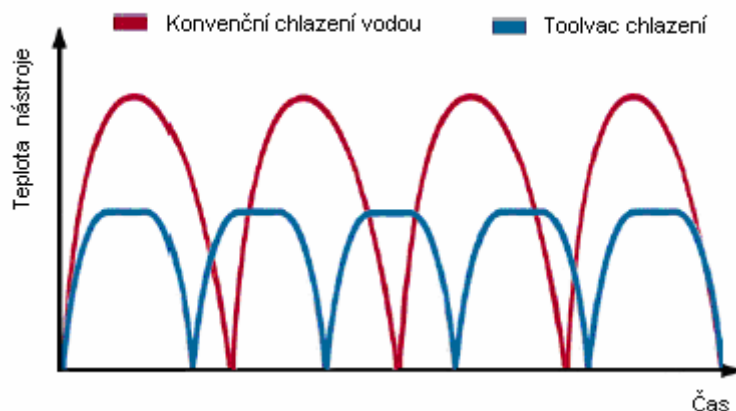
Druhým významným problémem, který řeší systém chlazení výstřiku TOOLVAC®, je odvzdušnění formy. Pórovitá ocel totiž výrazně eliminuje uzavření vzduchu ve formě, který vzniká při procesu vstřikování a má negativní vliv na jakost výrobku. Kapacita odvzdušnění záleží na procentu pórovitosti materiálu, tedy poměru mezi velikostí zrn a pórů. Odstraněním plynu z formy se usnadní nejen vyhození výstřiku, ale výrazně zlepší i jeho konečný vzhled.



Obr. 2.25: Odvzdušnění formy /21/

Mezi přednosti této metody temperace nástroje patří zejména rychlý odvod tepla a tím snížení doby chlazení. Zároveň ale i zvýšení produktivity práce, rovnoměrné rozložení teplotních polí na povrchu tvářeného dílu spojené s vyšší kvalitou výrobku, účinné chlazení tlustostěnných částí výstřiků a možnost využití pórovité oceli k odvzdušnění formy (porézní ocel tak zabráňuje uzavírání vzduchu v zadních pozicích formy). Také flexibilita umístění kapilár pro přívod CO₂ spojená s odstraněním mnohdy složitého rozložení chladicího systému s temperačními kanály zjednodušuje konstrukci formy a návratnost pořizovacích nákladů na tuto technologii je tudíž velmi rychlá. Obr. 2.26 znázorňuje ušetřený čas (o ¼) při chlazení ve srovnání s konvenčním způsobem chlazení vodou, tím se dosáhne zvýšení produktivity o 25 %.

Produktivita: +25%



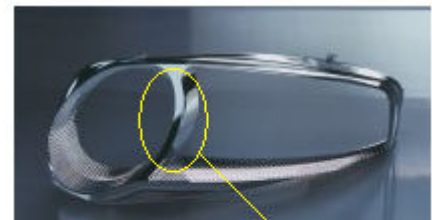
Obr. 2.26: Porovnání produktivity TOOLVAC chlazení oproti vodnímu chlazení /21/

2.7 Aplikace CO₂ u konvenční nástrojové oceli (bodové chlazení)

Koncem roku 2007 přináší německá společnost Linde Gas a.s. na český trh novou metodu chlazení vstřikovacích forem využívající k odvodu tepla z výstřiku oxid uhličitý. Tato nová technologie chlazení má být používána jako doplněk k již stávajícím formám, které jsou chlazeny systémem s temperačními kanály s proudícím teplotonosným médiem, a výrazně tak snížit dobu chlazení.

2.7.1 Problémy při konvenčním chlazení temperačními kanály s proudícím médiem /19/

Jak již bylo popsáno v kap. 2.3, nejrozšířenějším způsobem temperace vstřikovacích forem je stále použití temperačních kanálů s proudícím teplotonosným médiem. Častým problémem tohoto způsobu chlazení je ovšem nerovnoměrný odvod tepla z formy a dlouhá doba chlazení, která má největší vliv na celkový čas vstřikovacího cyklu (viz. obr. 2.4) a tedy i hospodárnost výroby. Soustava temperačních kanálů a jejich zabudování do vstřikovací formy je omezena prostorem ve formě, zejména vyhazovacím systémem. Kanály jsou často vedeny místy, která jsou dána prostorem ve formě, nikoliv tam, kde by bylo chlazení efektivnější. Problematická místa z hlediska chlazení, jako jsou např. úzká jádra nebo velmi tenké části výstřiku (obr. 2.30), nejsou chlazeny vůbec nebo jen velmi problematicky. Odlišná teplota v různých místech výstřiku má za následek vznik tzv. horkých bodů, které se projeví na vstřikovaném dílci oblastmi s různým stupněm lesku na povrchu a velkým vnitřním pnutím. Tyto horké body nejen že snižují kvalitu výrobku, ale jsou i určující pro celkovou dobu chlazení a tím prodlužují vstřikovací cyklus. Dalším problémem u proudící kapaliny (ve většině případů vody) je usazování nečistot v temperačních kanálech.



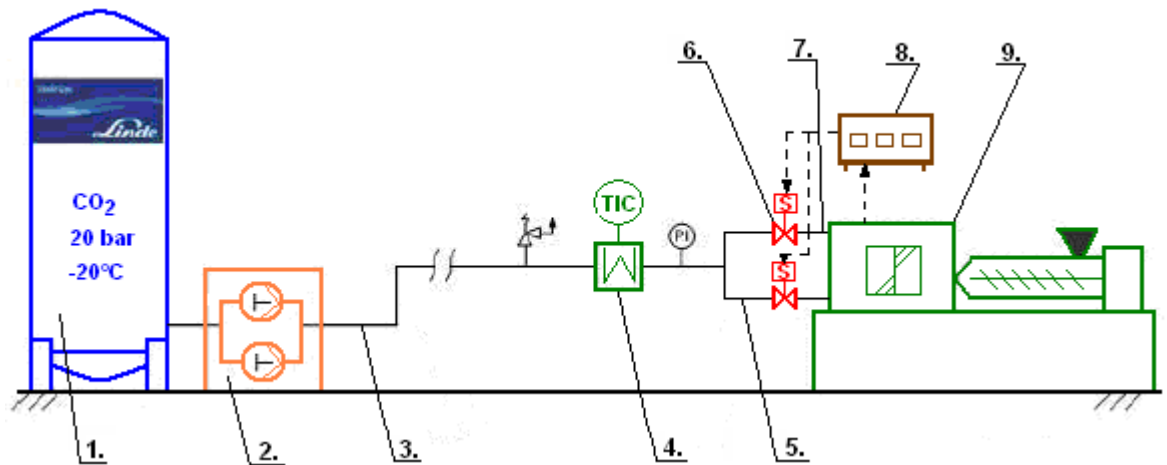
Nelze chladit běžným způsobem temperace s kanály a teplotonosným médiem

Obr. 2.27: Problematické místo z hlediska chlazení /20/

Zamezením optimálního průtoku temperační kapaliny rovněž klesá výkon chlazení a vznikají tak komplikace s vyčištěním kanálů a prodleva při výrobě.

2.7.2 Princip chlazení, příslušenství /19/, /20/, /21/

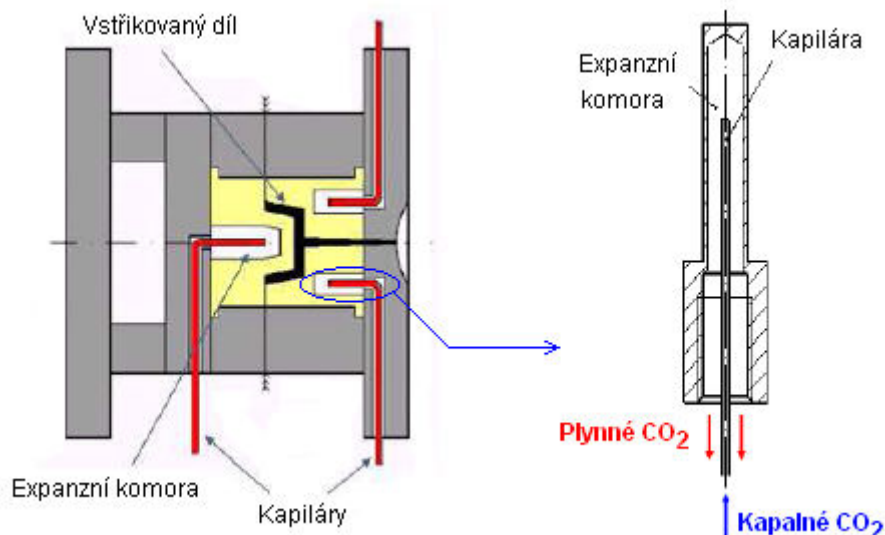
Na obr. 2.28 je schématicky znázorněn princip vedení CO₂ z tlakových lahví až do formy včetně příslušenství, které je zapotřebí k provozu tohoto nekonvenčního způsobu chlazení.



1. Zásobník CO₂ (tlakové lahve, minitanky)
2. Kompresorová stanice
3. Potrubí pro přívod CO₂ do vstřikovacího stroje
4. Elektrický ohřívač
5. Hadice pro CO₂
6. Solenoidové ventily
7. Kapilární trubičky
8. Kontrolní a řídicí jednotka
9. Vstřikovací stroj s formou

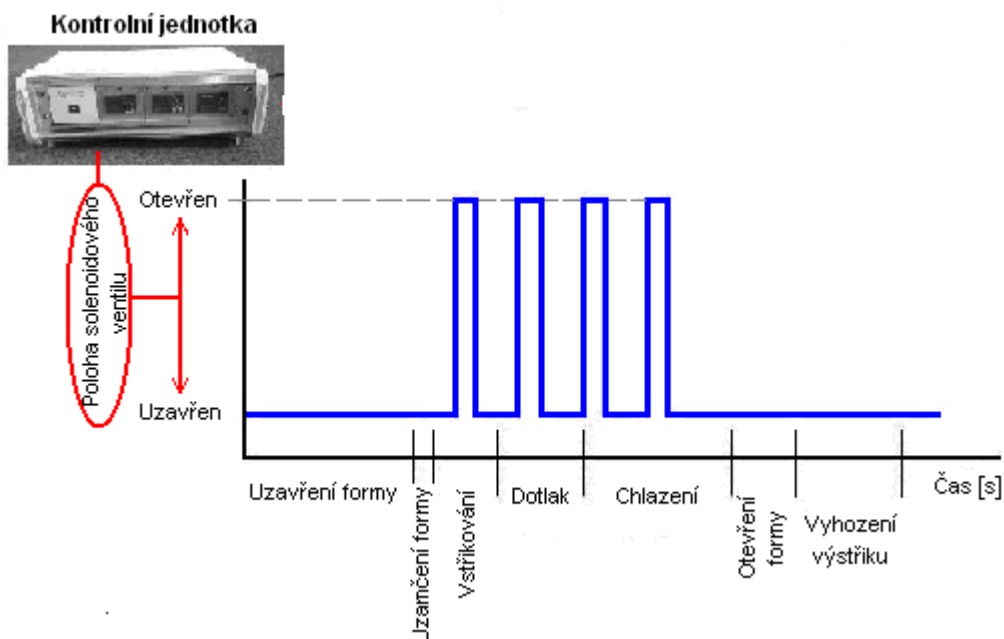
Obr. 2.28: Schéma vedení CO₂ a potřebné příslušenství

Princip této nové nekonvenční technologie chlazení spočívá v přivedení kapalného CO₂ ze zásobníku (tanku nebo tlakové láhve) pomocí kompresoru přes solenoidové ventily až do rozvodných kapilár, které se umísťují ve formě do míst potřebných k nejintenzivnějšímu chlazení. Obvykle to jsou místa, kde je jen velmi obtížně nebo nemožné vést temperační kanály s teplotním médiem jako tenká jádra, úzké dlouhé tvárníky, tlustostěnné části výrobků apod. (viz. obr. 2.27). Kapiláry jsou tenké trubičky o průměru 0,8 nebo 1,6 mm, ve kterých kapalným CO₂ expanduje vlivem poklesu tlaku (viz. kap. 2.3.1, kap. 2.3.3) a mění své skupenství na plynné. Ke změně skupenství je zapotřebí energie, kterou odebírá CO₂ formou tepla z výstřiku a tímto způsobem je výstřik chlazen. Na rozdíl od technologie TOOLVAC® slouží k odvodu tepla pouze povrch stěn expanzního prostoru, nikoliv celý prostor obklopující tvarovou dutinu formy.



Obr. 2.29: Schéma přívodu CO₂ do formy (vlevo) /19/, detail (vpravo) /19/

Uvolněný plyn se vrací drážkou, ve které je kapilára vedena, zpět z formy. V případě uzavřeného okruhu se plynný CO₂ vrací k novému zkapalnění a uskladnění do tlakových lahví. Z hlediska rovnoměrného odvodu tepla a dosažení optimální požadované teploty formy je množství chladicího média vpouštěno přes solenoidové ventily do kapilár v předem nastavených časových intervalech, jak popisuje obr.2.30. Přívod kapalného CO₂ obstarává otevřením nebo uzavřením solenoidových ventilů řídicí a kontrolní jednotka, která je napojena na vstřikovací stroj. Jako nulový bod, ke kterému je vztažen počátek impulsního řízení vpouštění CO₂ do kapilár, byl u poloautomatické výroby vzat signál stroje o uzavření formy.

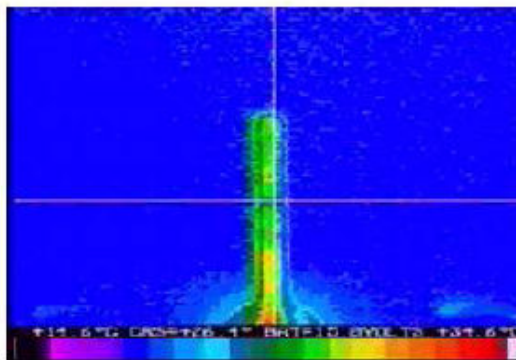


Obr. 2.30: Příklad impulsního řízení přívodu kapalného CO₂

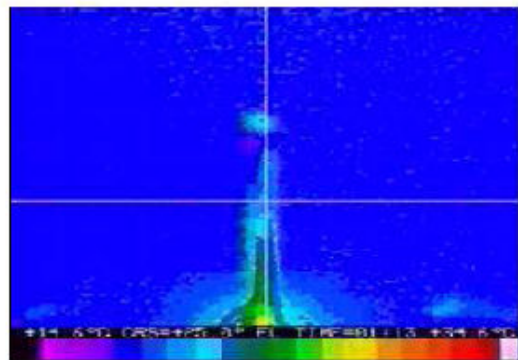
Vrtané otvory ve formě pro umístění kapilár nesmí obsahovat žádné ostré hrany nebo přechody, které by mohly poškodit plášť trubičky a způsobit tak únik plynného oxidu uhličitého.

2.7.3 Výhody této technologie a možné použití /19/

Snížit dobu chlazení a tím významně uspořit cenný čas při technologii vstřikování plastů je hlavním důvodem navrhovat a konstruovat stále nové nekonvenční metody temperace forem. Metoda bodového chlazení s použitím kapalného CO₂ jako temperačního média se používá zpravidla jako doplňková technologie k již velmi používanému temperování forem chladicími kanály s teplotnosným médiem, nejčastěji s vodou. Z toho plyne jasná a cenově velmi důležitá přednost této metody, a to použití v již existujících formách bez nutnosti výraznější konstrukční úpravy. Již z názvu vyplývá, že tato metoda je aplikována pouze do určitých míst ve formě, kde je konstrukčně jen velmi obtížné, ne-li nemožné vést temperační kanály s médiem. Jsou to například dlouhá jádra, tenké můstky (viz. obr. 2.27), tlustostěnné části výrobků apod. Porovnání chlazení úzkých jader oběma metodami (vodou i CO₂) ve stejný čas po vyjmutí z formy představuje obr. 2.31. Z termovizního snímku je patrný účinný a velmi rychlý odvod tepla z jádra při chlazení s CO₂. Zamezí se tak vzniku tzv. horkých bodů, které se mohou vyskytnout při špatném naddimenzování nebo ne příliš ideálním konstrukčním řešení temperačního systému a projevují se oblastmi s odlišným stupněm lesku a velkým vnitřním pnutím. Rozdíl v době chlazení je u těchto obtížných oblastí výrazný, úspora času se může pohybovat až kolem 50 % ve prospěch CO₂. Velká flexibilita umístění kapilár zaručuje kromě rychlého i rovnoměrný odvod tepla z formy spojený s vyšší kvalitou povrchu výstřiku. Díky velmi malým průměrům (0,8 a 1,6 mm) lze umístit kapiláry téměř do jakéhokoliv místa ve formě, aniž by bylo požadováno složitější konstrukčního řešení.



Konvenční chlazení temperačními kanály



Chlazení pomocí CO₂

Obr. 2.31: Termovizní snímek jader po vyjmutí z formy ve shodný čas /19/

2.8 Polarizační mikroskopie /24/, /25/

Z hlediska zkoumání a vyhodnocení nadmolekulární struktury plastů a s tím spojený výsledný vliv na vlastnosti vstříknutého dílce (viz. kap. 2.2.3), je velmi vhodná, nedestruktivní a snadno aplikovatelná metoda využívající polarizovaného (tzn. usměrnění kmitů do jedné roviny) světla, která se nazývá polarizační mikroskopie. Struktura se zjišťuje na velmi tenkém vzorku, jehož tloušťka závisí na druhu zkoumaného materiálu a jeho struktuře.

Vzorek je řezán pomocí bříty nebo žiletky na rotačním mikrotomu, jehož příklad je uveden na obr. 2.32. Vzorek je zkoumán na polarizačním mikroskopu (obr. 2.33), jehož nejdůležitější částí

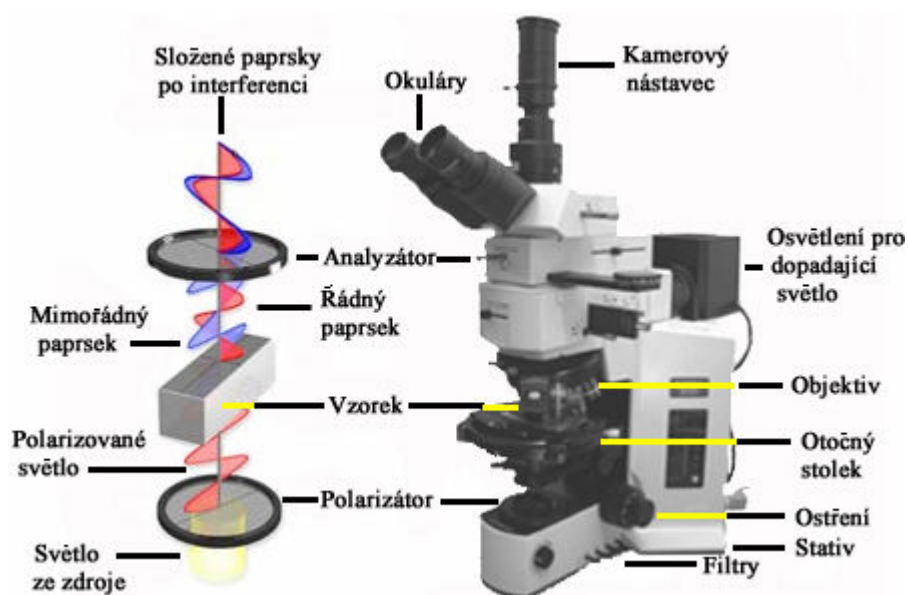
je polarizační zařízení skládající se ze dvou nikolů – polarizátoru a analyzátoru. Jsou to filtry uložené v optické ose mikroskopu. V případě, že roviny těchto filtrů jsou na sebe kolmé (tzn. filtry jsou

křížem), je zorné pole v mikroskopu temné a proto jednolomné látky zůstávají tmavé a nejsou zobrazeny. Oproti tomu dvojlomné látky (tzn. původní paprsek se rozdělí na dva nové), jako jsou krystalické polymery, mění rovinu kmitu procházejícího světla.

Každý polarizovaný paprsek procházející přes polarizátor se při průchodu takovou to anizotropní látkou rozloží na dva nové a navzájem fázově posunuté paprsky (tzn. šíří se různou rychlostí), které se nazývají řádný a mimořádný. Tyto paprsky kmitají v různých rovinách a na zkřížených filtrech jsou zobrazeny světle, případně barevně při použití bílého (složeného) světla vlivem interference.



Obr. 2.32: Rotační mikrotom
/24/



Obr. 2.33: Polarizační mikroskop Olympus BX 51P /25/

2.9 Termovizní měření teploty polí /26/, /27/, /28/

Vzhledem k zaměření diplomové práce na účinnost temperačního systému formy, je nutné sledovat a vyhodnocovat rozložení teplotních polí na výstřiku, abychom určili správný a nejefektivnější způsob odvodu tepla z formy, potažmo z výstřiku. Měření a sledování průběhu teplot v závislosti na čase je možné dotykovým nebo bezdotykovým způsobem. V diplomové práci je použita metoda bezdotykového snímání teplot z výstřiku pomocí termovizní kamery.

Princip měření termovizní kamery spočívá ve vyhodnocení oblasti infračerveného spektra, které vyzařuje každý objekt, jehož teplota se nachází nad hodnotou absolutní nuly (tj. $0\text{ K} = -273^\circ\text{C}$). Číselně lze toto pásmo vyjádřit v rozmezí vlnových délek $0,75\text{ }\mu\text{m}$ až 1 mm . Skutečnost, že vlnová délka tohoto záření závisí na teplotě objektu, popisují tři fyzikální zákony (Planckův vyzařovací zákon, Wienův posunovací zákon a Stefan-Boltzmanův zákon), které z hlediska zaměření diplomové práce není potřeba dále rozvádět. Lze však říci, že čím je teplota vyšší, tím je vlnová délka vydávaného záření kratší. Vyzařované infračervené záření dopadá přes optiku termovize na snímač (detektor), který jej převádí na elektrický signál. Ten je poté zesílen a analogově nebo digitálně zpracován do standardní podoby vhodné pro záznam nebo zobrazení na obrazovce či displeji.

Před vyhodnocením termovizního snímku je nutné zadat okrajové podmínky, mezi které patří emisivita povrchu (u plastů se tato hodnota pohybuje mezi $0,8$ - $0,95$), odražená teplota, vzdálenost mezi objektem a kamerou, relativní vlhkost a teplota vnějšího i vnitřního vzduchu. Chybně zadaná emisivita povrchu nebo odražená teplota může způsobit značnou chybu ve výsledku měření.



Obr. 2.34: Termovizní kamera ThermoCAM P65 (vlevo) /26/, snímek z termokamery (vpravo)

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Jelikož je systém bodového chlazení vstřikovacích forem pomocí kapalného CO₂ poměrně novou metodou, bylo hlavním cílem experimentální části této diplomové práce zejména:

1. vybrat vhodný díl pro možnou aplikaci bodového chlazení s CO₂
2. provést termovizní měření pro stávající systém chlazení s temperačními kanály a cirkulujícím teplotním médiem - vodou
3. navrhnout vhodné umístění kapilár pro přívod CO₂ tak, aby bylo dosaženo optimálního odvodu tepla z výstřiku, resp. z formy

Výsledný návrh rozmístění kapilár pro přívod CO₂ byl proveden z teoretických podkladů o bodovém chlazení od společnosti Linde Gas a.s., a také podle rozložení teplotních polí na povrchu zkoumaného vzorku bezdotykovým způsobem měření teplot pomocí termovizní kamery.

3.1 Vybraný plastový díl

Pro vyhodnocení účinnosti bodového chlazení s CO₂ byl dle předpokladů uvedených v kap. 2.7.1 zvolen plastový díl – zadní levá loketní opěrka (obr. 3.1) dodávaná do automobilů Audi A3 (obr. 3.2). Jedná se o středně rozměrný tvarově složitější díl s hmotností 176,2 g.



Obr. 3.1: Zadní levá loketní opěrka

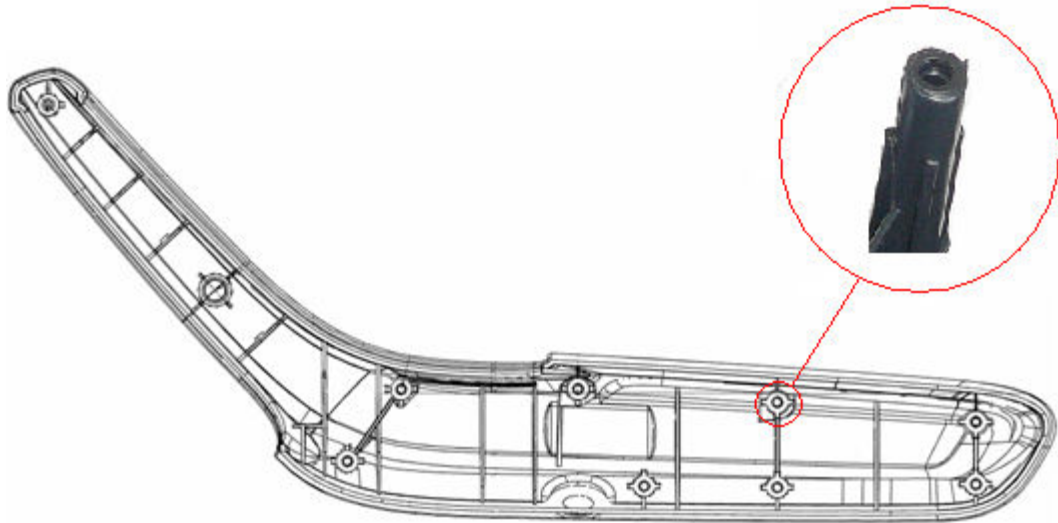
a) vzhledová strana opěrky

b) montážní strana opěrky



Obr. 3.2: Audi A3 (vlevo), pohled na loketní opěrku uvnitř automobilu (vpravo) /29/

Na tomto dílu se nachází na nevzhledové straně devět úzkých dlouhých výstupků určených pro montáž do dvevní výplně, které jsou z důvodu tvaru, polohy a tloušťky stěny nejproblematictější oblastí na výrobku z hlediska chlazení a výrazně prodlužují dobu procesu a tím i vstřikovacího cyklu. Rozmístění výstupků je patrné ze schématického nákresu opěrky na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Detail výstupku na loketní opěrce

3.2 Používaný materiál /30/, /31/

Na výrobu loketní opěrky do automobilu Audi A3 je standardně používán amorfní termoplast Lustran ABS H801. Vzhledem k zaměření diplomové práce, kdy bylo zapotřebí i částečně analyzovat vliv teploty teplosměnným médiem (v tomto případě vodou) na vstřikovanou součást, byl použit i semikrystalický termoplast z důvodu možnosti sledovat případné změny nadmolekulární struktury (morfologie) v polarizovaném světle optického mikroskopu. Z hlediska požadavků výrobce byl zvolen polypropylén s přesným označením SABIC PP compound 2500/3. Hodnoty důležitých výrobních vlastností (zejména hodnota smrštění) mají oba materiály velmi podobné.

3.2.1 Charakteristika amorfního materiálu /30/

Lustran ABS H801 je amorfní termoplast modifikovaný polykarbonátem známý pod dřívějším označením Novodur H801. Mezi jeho přednosti patří vysoká teplotní odolnost, vysoká houževnatost a dobrá tekutost. Používá se v automobilovém průmyslu na technické díly (např. u vozu Audi TT) jako náhrada za dřívější ABS Lustran QE 1147 F, který nesplňoval emisní normy koncernu VW.



Tab. 3.1: Vybrané materiálové hodnoty materiálu Lustran ABS H801 /30/

Vlastnost	Jednotka	Hodnota	Norma
Hustota	kg/m ³	1070	ISO 1183
Smrštění (při teplotě taveniny 233 °C)	%	0,4 - 0,7	Interní předpis
Index toku taveniny (220 °C/98,1N)	g/10min	9	ISO 1133
Mez kluzu	MPa	49	ISO 527
Pevnost v tahu	MPa	-	ISO 527
Tažnost	%	3	ISO 527
Modul pružnosti v ohybu	MPa	2300	ASTM D790
Odolnost za tepla VICAT (B 50N)	°C	105	ISO 306
Teplota průhybu ISO 75 (B)	°C	105	ISO 75/B
Minimální zpracovatelská hodnota	°C	190	-
Maximální zpracovatelská hodnota	°C	270	-
Teplota formy	°C	40 - 80	-
Sušení (teplota / čas)	°C / hod	80 / 3	-

3.2.2 Charakteristika semikrystalického materiálu /31/

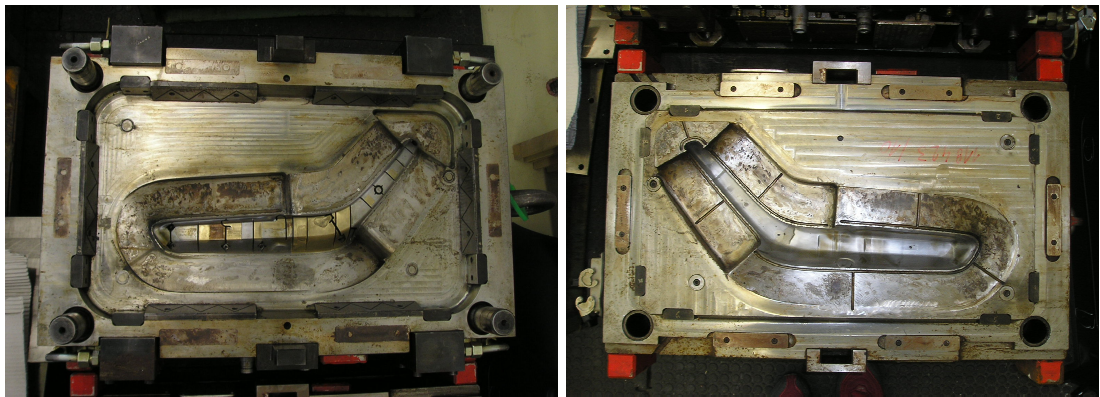
SABIC PP compound 2500/3 od holandského výrobce DMS je semikrystalický termoplast modifikovaný elastomerem a plněný minerálním plnivem (12 % talku) s vysokou houževnatostí i za nízkých teplot (-40 °C), dobrou tuhostí a pevností. Provedení může být v černé nebo šedé barvě, přičemž v černém odstínu je UV stabilní, v šedém nikoliv. Široké uplatnění nalézá v automobilovém průmyslu, zejména při výrobě nárazníků a podobných tvarově složitějších součástí. Materiál odpovídá normě VW TL 520035B.

Tab. 3.2: Vybrané materiálové hodnoty materiálu SABIC PP compound 2500/3 /31/

Vlastnost	Jednotka	Hodnota	Norma
Hustota	kg/m ³	960	ISO 1183
Smrštění (při teplot taveniny 233 °C)	%	0,9 - 1,1	Interní předpis
Index toku taveniny (230 °C/21,2N)	g/10min	8	ISO 1133
Mez kluzu	MPa	16	ISO 527
Pevnost v tahu	MPa	14	ISO 527
Tažnost	%	100	ISO 527
Modul pružnosti v ohybu	MPa	1000	ASTM D790
Odolnost za tepla VICAT (A 50N)	°C	126	ISO 306
Teplota průhybu ISO 75 (B)	°C	85	ISO 75/B
Minimální zpracovatelská hodnota	°C	200	-
Maximální zpracovatelská hodnota	°C	270	-
Teplota formy	°C	60	-

3.3 Popis vstřikovací formy

Výrobek je kaskádově vstřikován v jednonásobné formě s jednou dělicí rovinou. Rovnoměrné plnění tvarové dutiny formy zajišťují dva vtoky s bodovým ústím a jehlovým závěrem. Vyhození výstřiku obstarává skupina několika přímých a šikmých vyhazovačů ovládaných pneumaticky. Vedení a vystředění pevné části vůči pohyblivé části formy zajišťují čtyři vodící sloupky umístěné v rozích rámu formy. Pohled na pohyblivou část formy (tvárník) a nepohyblivou část formy (tvárnice) zobrazuje obr. 3.4.



Obr. 3.4: Snímek tvárníku (vlevo) a tvárnice (vpravo)

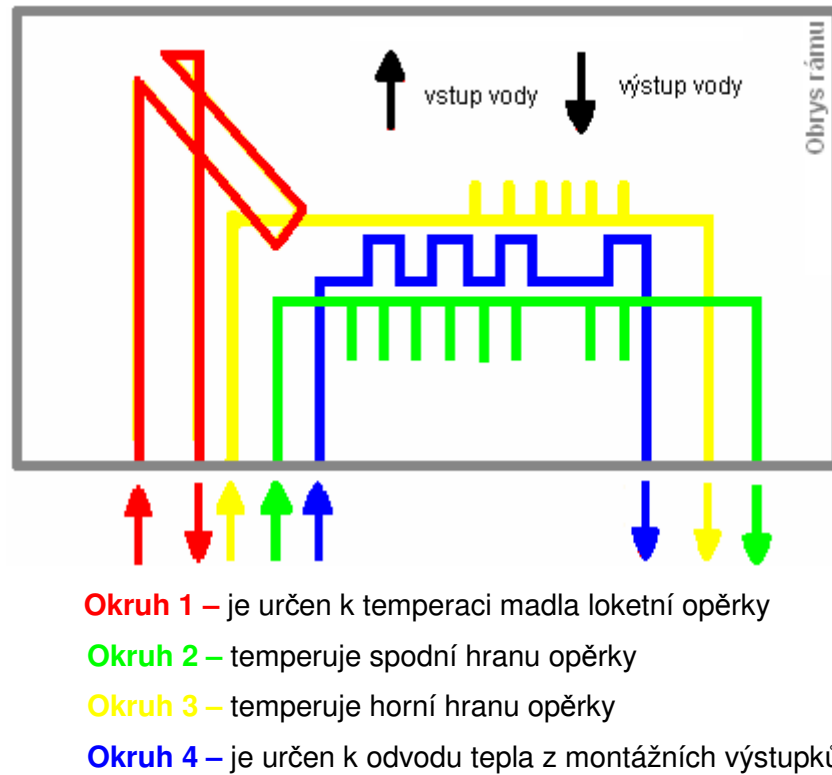
3.3.1 Způsob temperace formy

Forma je vybavena temperačním systémem skládajícím se ze soustavy kanálů s proudícím teplotním médiem. Jako teplotní médium byla používána voda o konstantní teplotě 16 °C.

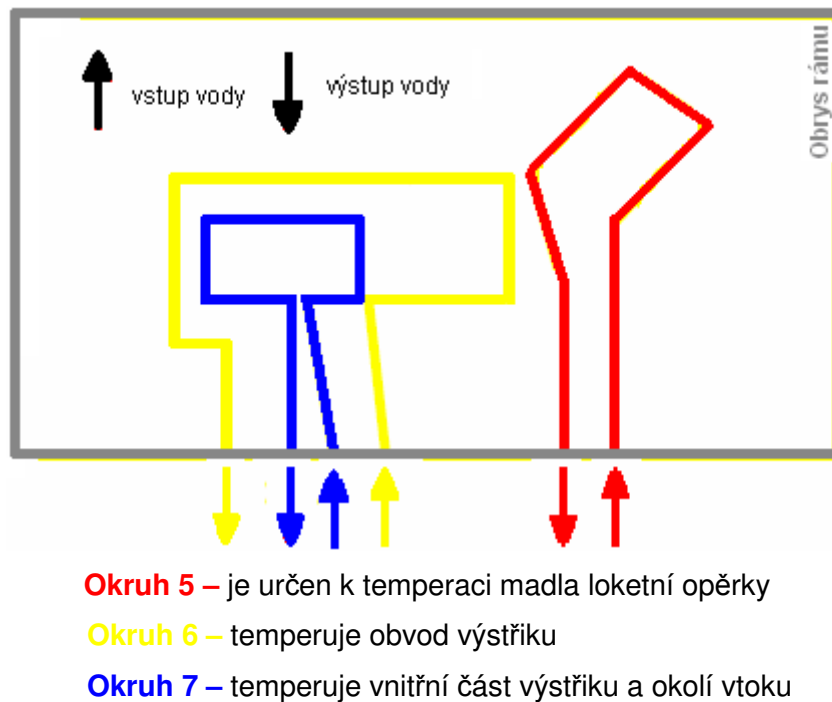
Celý temperační systém se skládá z několika okruhů rozmístěných tak, aby bylo dosaženo rovnoměrného a optimálního odvodu tepla ze všech částí výstřiku. Hlavní části formy (tvárník a tvárnice) nejsou temperovány stejným počtem okruhů, tvárnice obsahuje čtyři temperační okruhy, tvárník jen tři okruhy. Toto uspořádání je dáno konstrukcí formy, zejména pak umístěním vyhazovacího systému.

Rozdělení temperačních okruhů:

- ✖ Schématické rozmístění okruhů na tvárnici je zakresleno na obr. 3.5
- ✖ Schématické rozmístění okruhů na tvárníku je zakresleno na obr. 3.6



Obr. 3.5: Schematické znázornění temperačních okruhů na tvárnici (orientace tvarové dutiny shodná s obr. 3.4)



Obr. 3.6: Schematické znázornění temperačních okruhů na tvárníku (orientace tvarové dutiny shodná s obr. 3.4)

Všechny temperační okruhy jak na tvárnici, tak na tvárníku, byly napojeny na temperační agregát TT - 156E o maximálním výkonu 10,1 kW , který udržoval konstantní teplotu ve všech okruzích. Agregát je znázorněn na obr. 3.7.

Tab. 3.3: Vybraná technická data temp.agregátu /32/

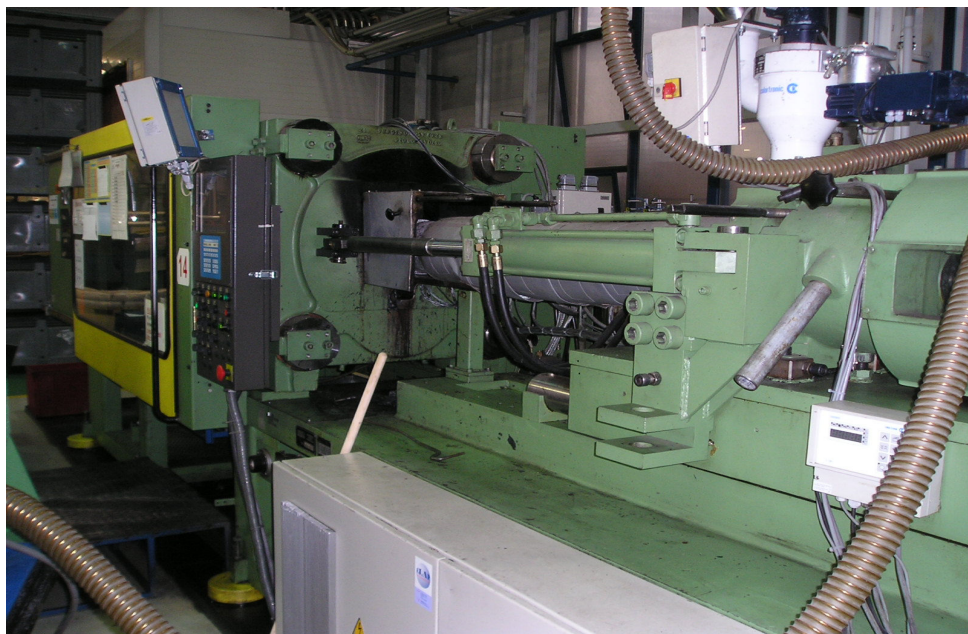
Temperační agregát Tool - Temp 156E		
Rozsah teplot pro vodu	15 - 90	°C
Rozsah teplot pro olej	< 150	°C
Topný výkon pro vodu	10,1	kW
Topný výkon pro olej	3	kW
Výkon čerpadla	75	l/min
Výkon čerpadla	4	bar



Obr. 3.7: Temperační agregát

3.4 Vstřikovací stroj

Pro výrobu loketní opěrky do automobilu Audi A3 byl použit hydraulický vstřikovací lis ENGEL ES 2000/420, který je zobrazen na obr. 3.8. Tento lis je vybaven uzavírací jednotkou schopnou vyvinout maximální sílu 4200 kN a vstřikovací jednotkou se šnekem o průměru 60 mm schopnou dosáhnout maximálního vstřikovacího tlaku 1900 barů.



Obr. 3.8: Vstřikovací lis ENGEL ES 2000/420



Ostatní důležité parametry vstřikovacího stroje jsou uvedeny v tab. 3.4.

Tab. 3.4: Parametry vstřikovacího stroje ENGEL ES 2000/420 /33/

Vstřikovací lis ES 2000/420		
Uzavírací síla	4200	kN
Průměr šneku	60	mm
Zdvihový objem	848	cm ³
Maximální vstřikovací tlak	1900	bar
Rozměr mezi sloupy	660 x 660	mm
Upínací desky	1000 x 1000	mm
Minimální výška formy	400	mm
Maximální výška formy	700	mm
Maximální otevření	1510	mm

3.5 Podmínky vstřikování

Pro sériovou výrobu ložetní opěrky do automobilu Audi A3 byly nastaveny jednotlivé technologické parametry vstřikovacího stroje pro materiál Lustran ABS H801 dle tab. 3.5. Vzorky pro termovizní měření teploty povrchu opěrky byly vstřikovány v sérii 40 kusů jak z ABS, tak z PP. Pro měření nadmolekulární struktury pomocí polarizačního mikroskopu byly vybrány vzorky vždy z lichých zdvihů stroje a jelikož bylo v sérii vyrobeno 40 kusů výrobků, jsou vzorky označeny čísly 1 – 39.

Tab. 3.5: Nastavení základních technologických parametrů při vstřikování opěrky
/35/

Technologické parametry při vstřikování opěrky		
Teploty [°C]	Pod násypkou	220
	Válec	230 - 245
	Špička	250
	Horký rozvod	250
Tlaky [MPa]	Uzavírací tlak	16
	Vstřikovací tlak	16
	Dotlak	13
	Odpor šneku	3
Časy [sec.]	Vstřikovací čas	2,5
	Dotlak	3
	Plastikace	14,7
	Chlazení	30
	Cyklus	50,2

3.6 Termovizní měření

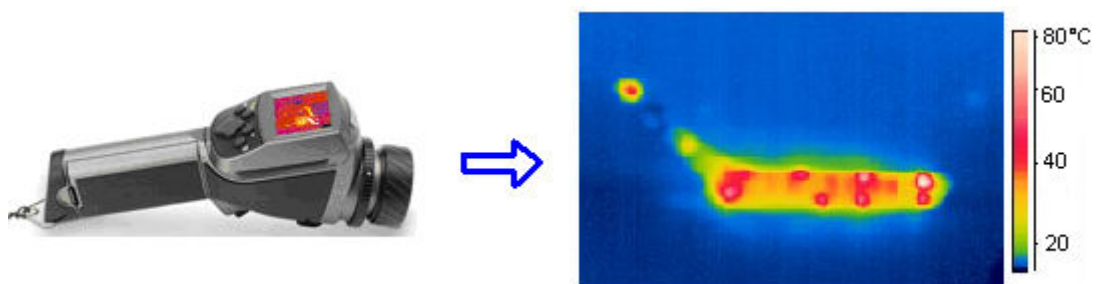
Teplotní pole povrchu výstřiku bylo měřeno bezdotykovým způsobem pomocí termovizní kamery ThermoCAM™ E320 založené na principu infračerveného snímání, jejíž princip je vysvětlen v teoretické části této diplomové práce (kap. 2.9).

3.6.1 Termovizní kamera ThermoCAM™ E320 /36/

Termovizní kamera ThermoCAM™ E320 od společnosti Flir systems (obr. 3.9) umožňuje velmi rychlé a snadné bezkontaktní měření teploty povrchu součástí s následným zobrazením na vysoko kontrastním LCD panelu s rozlišením 320 x 240 bodů. Takto zobrazený snímek může být poté převeden a uložen v digitální kvalitě pro následnou analýzu a podrobný rozbor na počítači pomocí softwaru ThermoCAM QuickView, dodávaného spolu s termokamerou. V běžné kvalitě formátu (JPEG formát) je možné do paměti kamery uložit až 80 snímků pro následné vyhodnocení. Přesné zaměření cílové oblasti pro změření teplotních polí je umožněno díky laserovému ukazovátku. Kamera je určena pro provoz za všech povětrnostních podmínek.

Vybrané technické parametry kamery:

- × Vysoká rozlišovací schopnost obrazu (320 x 240 bodů)
- × Tepelná citlivost 0,1 °C
- × Rozsah teplot: - 20 °C až + 500 °C nebo +500 °C až + 1200 °C
- × Rozsah spektra záření 7,5 – 13 μm
- × Přesnost ± 2 °C , ± 2%
- × Nastavení emisivity v rozsahu 0,1 – 1,0 (pro plasty e = 0,95 – 0,96)
- × 4 x digitální zvětšení (4-násobný zoom)
- × Laserové ukazovátko
- × Barevný 2,5 palcový displej
- × Vestavěná paměť na 80 snímků v běžné kvalitě (JPEG formát)
- × Hmotnost 800 g včetně baterie
- × Rozměry 272 x 80 x 105 mm



Obr. 3.9: Termovizní kamera ThermoCAM™ E320 (vlevo) /36/ a příklad snímku pořízeného z kamery (vpravo)

3.6.2 Experimentální měření teplotních polí

Teplota povrchu vstřikovaného dílu byla měřena vždy po vyjmutí z formy a přenesení na k tomu určené místo, tedy vždy po uběhnutí 15 s od otevření formy.

Pro lepší analýzu rozložení teplotního pole na povrchu výstřiku byl obraz snímán ze dvou stran ložetní opěrky. Oba pohledy jsou znázorněny na obr. 3.8. Snímky byly pořízeny termokamerou ThermoCAM™ E320 a následně upraveny v počítači pomocí softwaru dodaného spolu s termokamerou.



Obr. 3.10: Zvolené pohledy na výstřik při snímání teploty povrchu

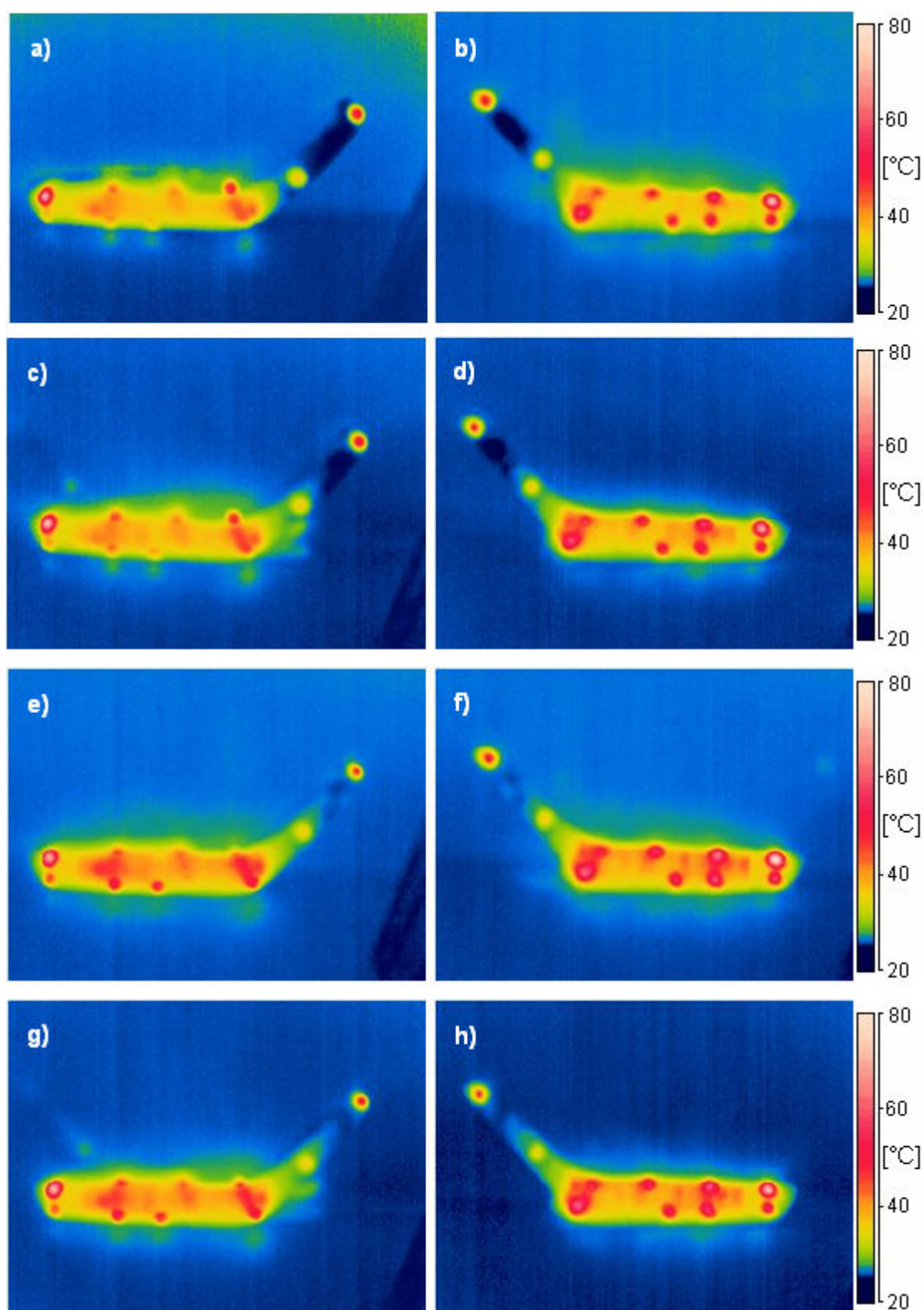
a) Pohled na vzhledovou stranu opěrky

b) Pohled na nevzhledovou (montážní) stranu opěrky s výstupky

Výsledky experimentálního měření teplotních polí na povrchu opěrky jsou v grafickém vyjádření seřazeny vzestupně podle čísel udávající díl vyrobený v sérii. Pro snazší porovnání teplotních polí jsou vedle sebe uvedeny pohledy z obou stran výrobku pro daný díl v sérii, vlevo vždy pohled na vzhledovou stranu, vpravo pohled na nevzhledovou (montážní) stranu výrobku. Všechny vzorky byly vstřikovány při stejných technologických parametrech (viz. tab. 3.5). Před vlastním snímáním teploty povrchu bylo nutné do termovize nastavit okrajové podmínky, které jsou uvedeny v tabulce 3.6. Hodnota emisivity byla experimentálně určena pro daný díl dle referenčních vzorků (samolepek).

Tab. 3.6: Okrajové podmínky zadané do termokamery /37/

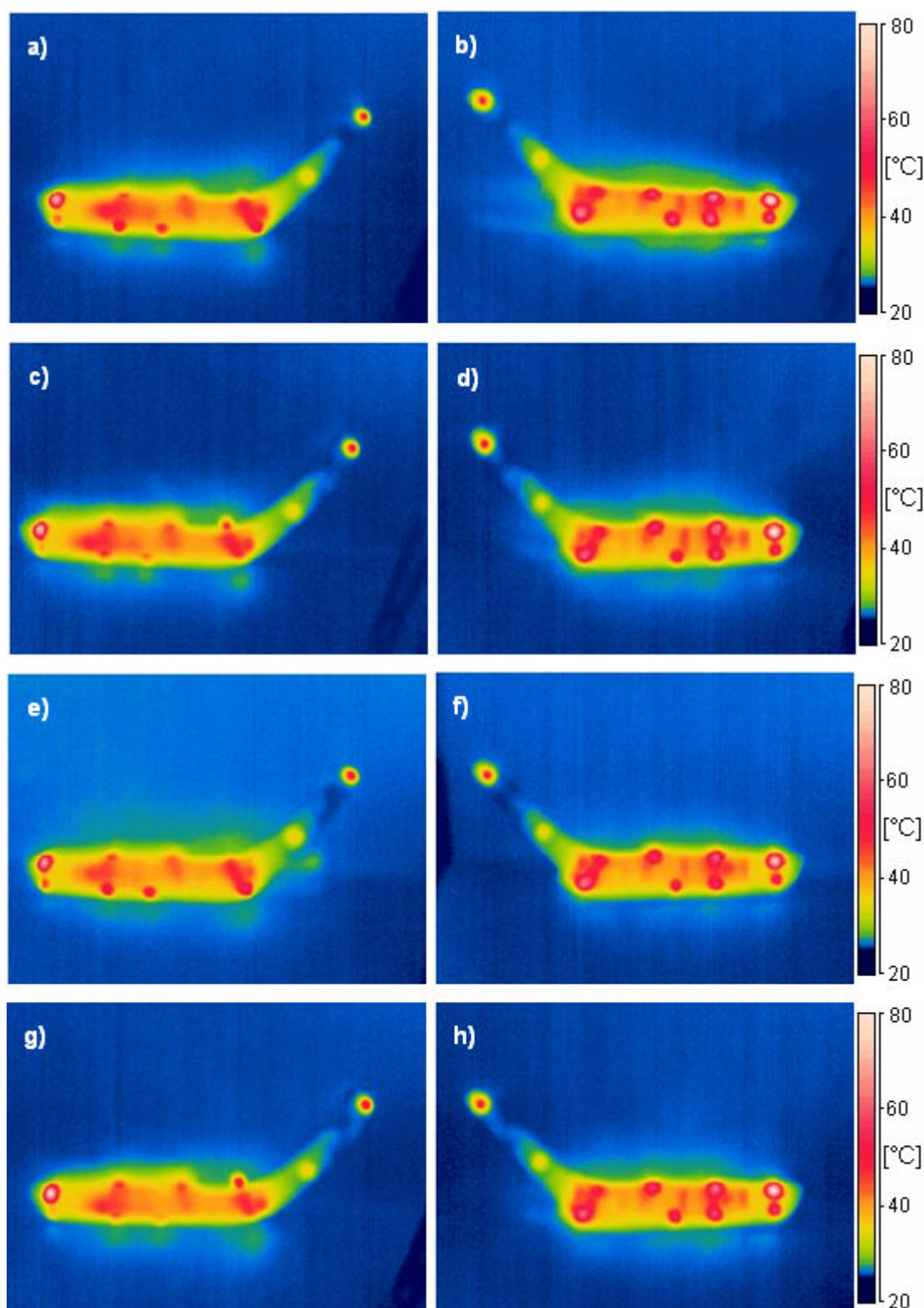
Podmínka	Hodnota	Jednotka
Emisivita	0,95	-
Odražená teplota	26	°C
Teplota okolního vzduchu	20	°C
Relativní vlhkost vzduchu	30	%
Vzdálenost mezi objektem a kamerou	2	m



Obr. 3.11: Grafické porovnání termovizního snímku opěrky z materiálu ABS H801:

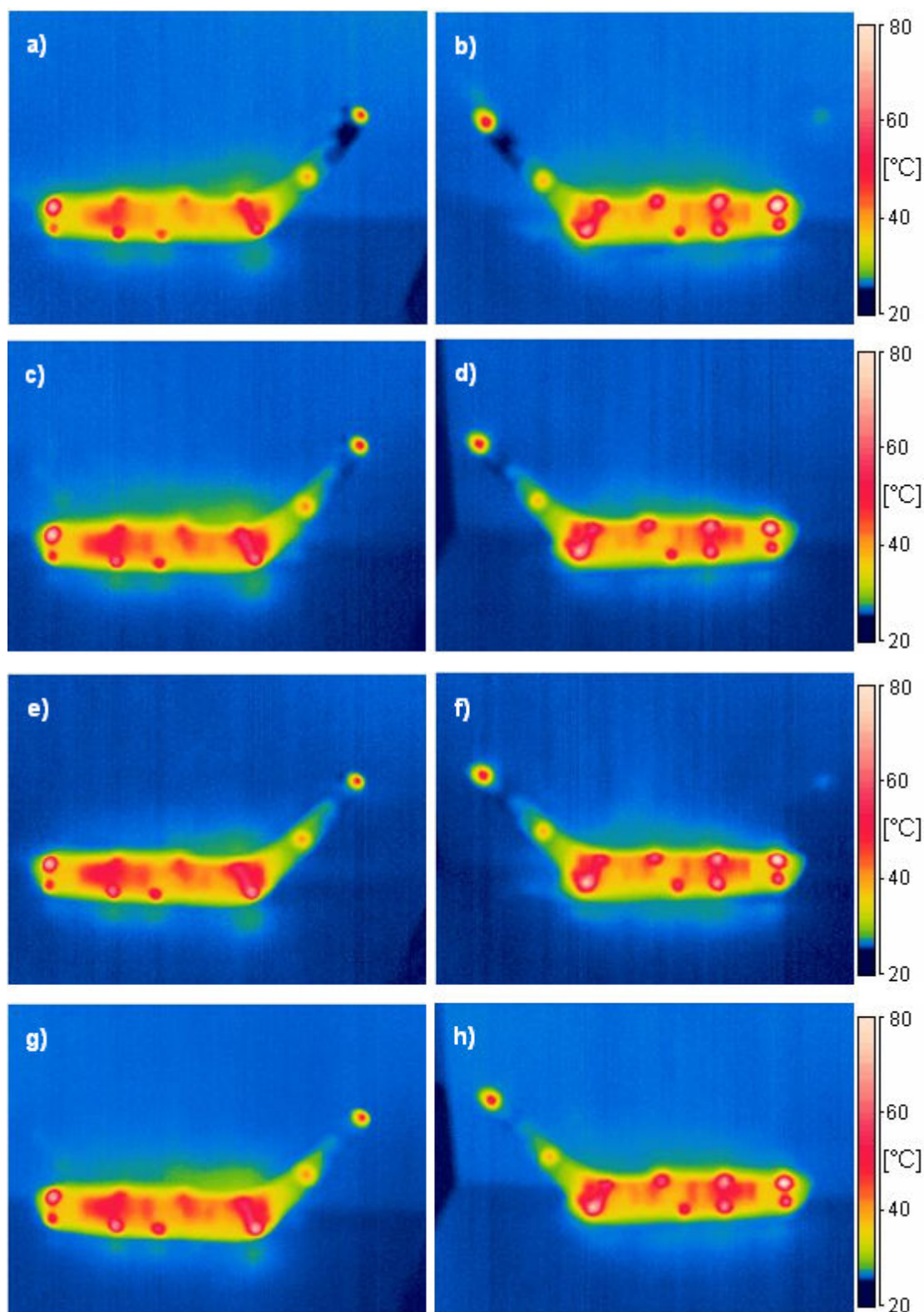
- a) vzorek č.1, vzhledová strana
- c) vzorek č.5, vzhledová strana
- e) vzorek č.10, vzhledová strana
- g) vzorek č.15, vzhledová strana

- b) vzorek č.1, montážní strana
- d) vzorek č.5, montážní strana
- f) vzorek č.10, montážní strana
- h) vzorek č.15, montážní strana



Obr. 3.12: Grafické porovnání termovizního snímku opěrky z materiálu ABS H801:

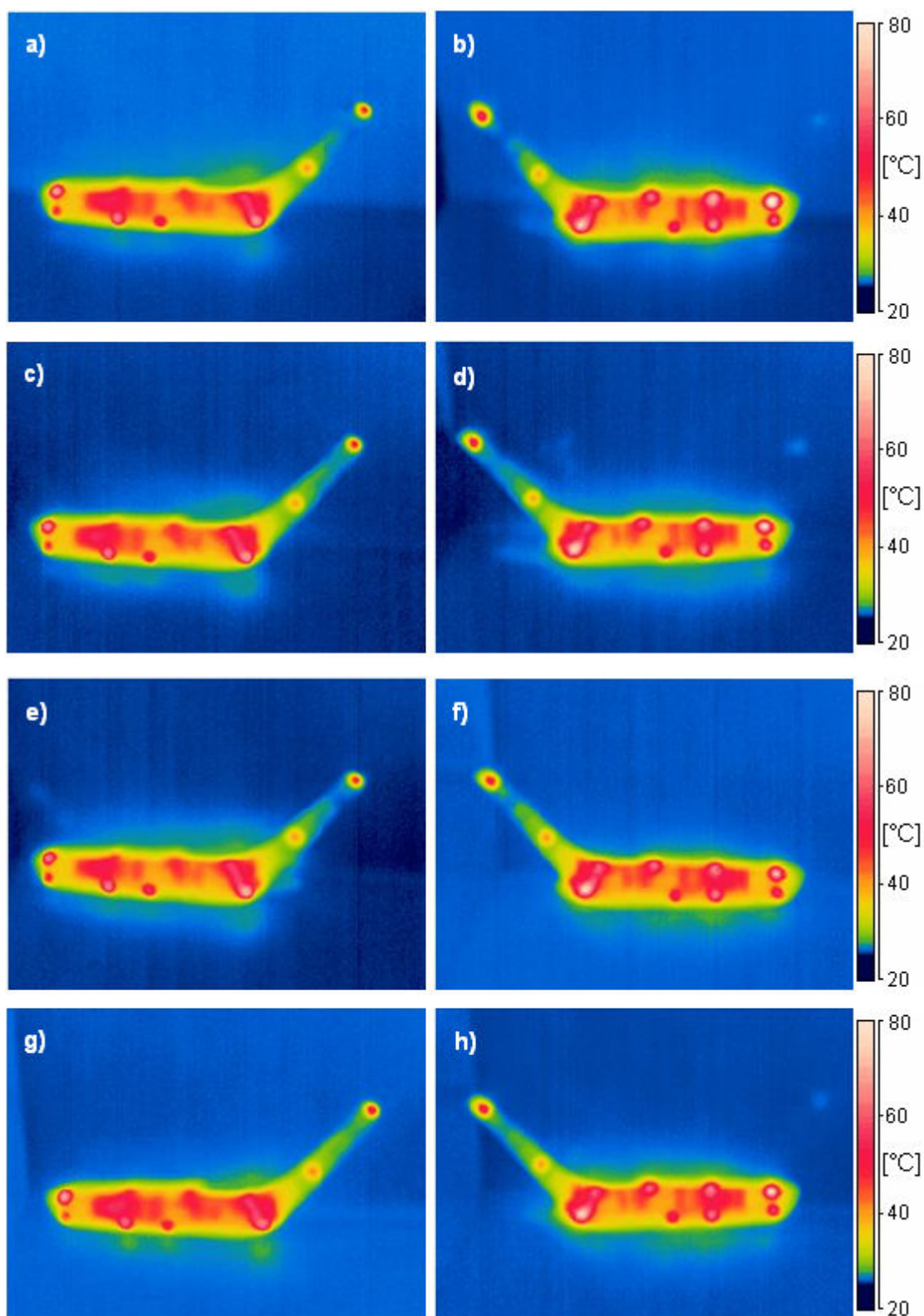
- | | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| a) vzorek č.20, vzhledová strana | b) vzorek č.20, montážní strana |
| c) vzorek č.30, vzhledová strana | d) vzorek č.30, montážní strana |
| e) vzorek č.35, vzhledová strana | f) vzorek č.35, montážní strana |
| g) vzorek č.40, vzhledová strana | h) vzorek č.40, montážní strana |



Obr. 3.13: Grafické porovnání termovizního snímku opěrky z materiálu PP:

a) vzorek č.1, vzhledová strana
c) vzorek č.5, vzhledová strana
e) vzorek č.10, vzhledová strana
g) vzorek č.15, vzhledová strana

b) vzorek č.1, montážní strana
d) vzorek č.5, montážní strana
f) vzorek č.10, montážní strana
h) vzorek č.15, montážní strana

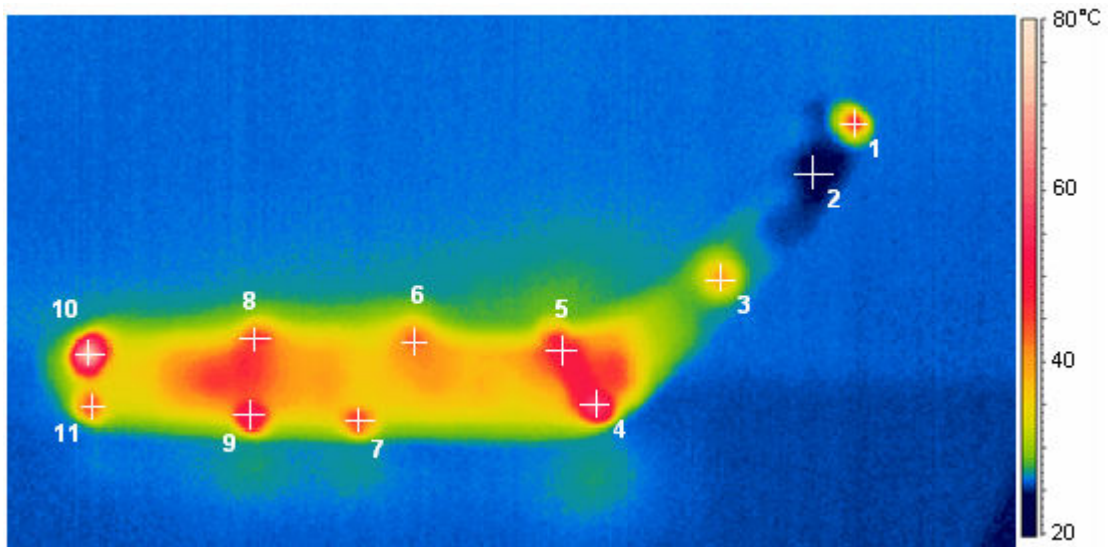


Obr. 3.14: Grafické porovnání termovizního snímku opěrky z materiálu PP:

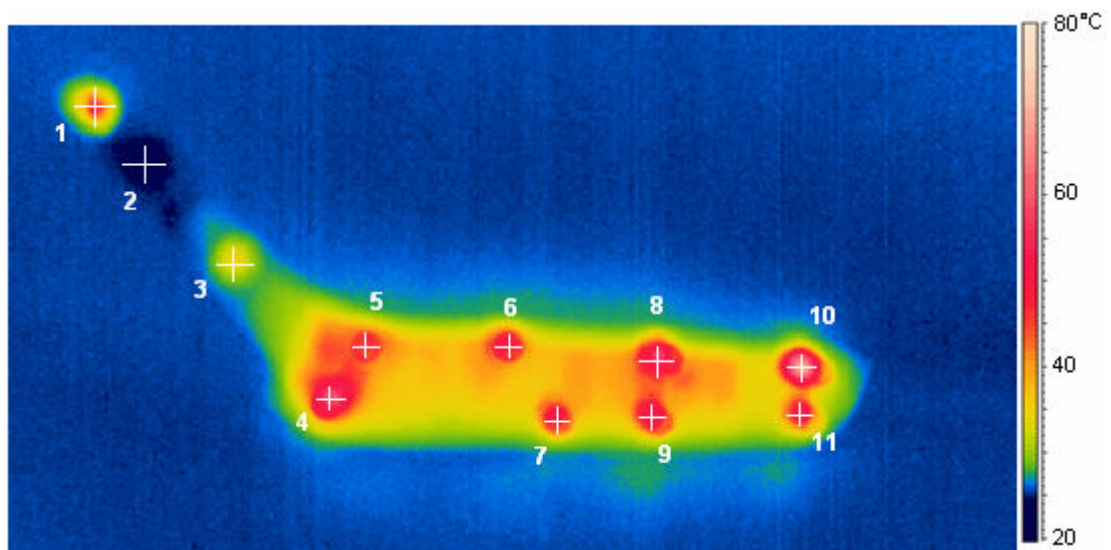
a) vzorek č.20, vzhledová strana
c) vzorek č.30, vzhledová strana
e) vzorek č.35, vzhledová strana
g) vzorek č.40, vzhledová strana

b) vzorek č.20, montážní strana
d) vzorek č.30, montážní strana
f) vzorek č.35, montážní strana
h) vzorek č.40, montážní strana

Přesné hodnoty teplot na povrchu výrobku jsou uvedeny v tab. 3.7 pro amorfní ABS a v tab. 3.8 pro semikrystalický PP. Jednotlivé oblasti, ve kterých byly tyto teploty měřeny, byly určeny na základě termovizních snímků a jsou vyobrazeny na obr. 3.15 (pohled na vzhledovou stranu opěrky, v tab. 3.7, 3.8 označeno *vzhled*) a obr. 3.16 (pohled na montážní stranu opěrky, v tab. 3.7, 3.8 označeno *montáž*). Grafické vyjádření jednotlivých teplot pro každou oblast měření u obou použitých materiálů ukazuje obr. 3.17 a obr. 3.18. Z důvodu velkého množství naměřených teplot (352 hodnot) jsou v tab. 3.8 vypsány pouze teploty tří dílů v sérii jak pro ABS, tak pro PP.



Obr. 3.15: Vyznačení oblastí pro přesné změření teploty povrchu opěrky na vzhledové straně výrobku

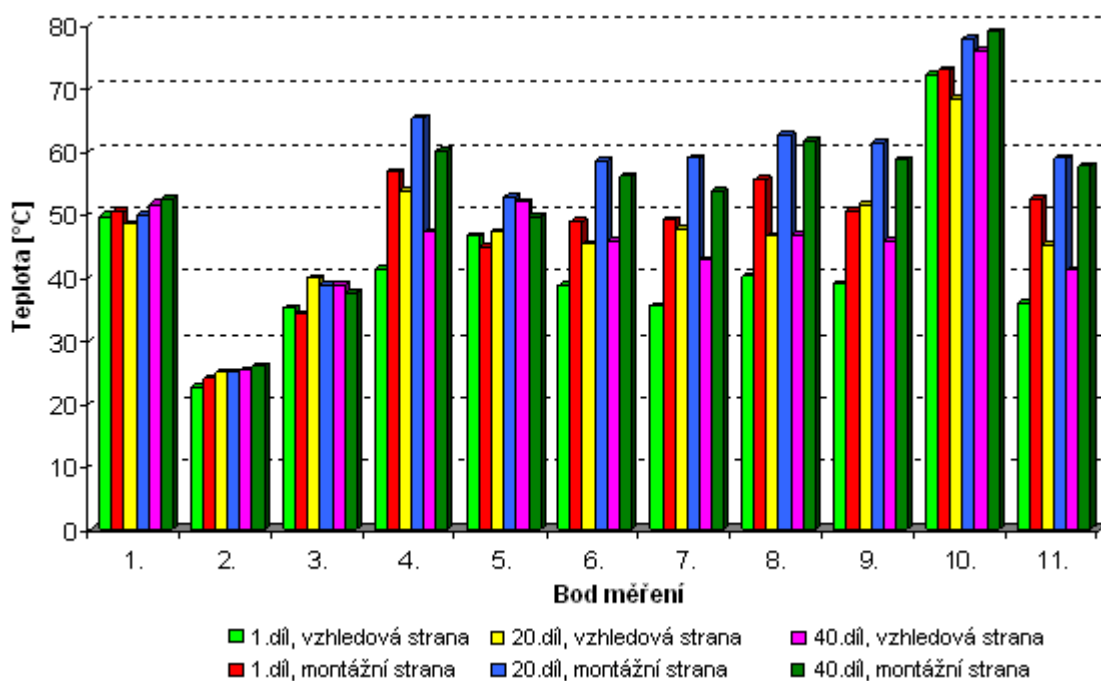


Obr. 3.16: Vyznačení oblastí pro přesné změření teploty povrchu opěrky na montážní straně výrobku



Tab. 3.7: Naměřené teploty na opěrce z ABS

Teploty povrchu [°C]						
Díl v sérii	1.		20.		40.	
oblast měření	vzhled	montáž	vzhled	montáž	vzhled	montáž
1.	49,6	50,3	48,3	49,7	51,5	52,3
2.	22,4	23,9	24,8	24,9	25	25,7
3.	35	34	39,7	38,7	38,7	37,4
4.	41,1	56,6	53,5	65,2	47,2	59,8
5.	46,5	44,8	47,1	52,5	51,8	49,5
6.	38,5	48,8	45,2	58,2	45,6	55,9
7.	35,3	48,9	47,6	58,7	42,6	53,5
8.	40	55,5	46,5	62,5	46,7	61,5
9.	38,9	50,5	51,3	61,2	45,7	58,4
10.	71,9	72,7	68,2	77,6	75,8	78,8
11.	35,8	52,4	44,9	58,7	40,9	57,5
Nejvyšší teplota	71,9	72,7	68,2	77,6	75,8	78,8
Nejnižší teplota	22,4	23,9	24,8	24,9	25	25,7
Rozdíl teplot	49,5	48,8	43,4	52,7	50,8	53,1

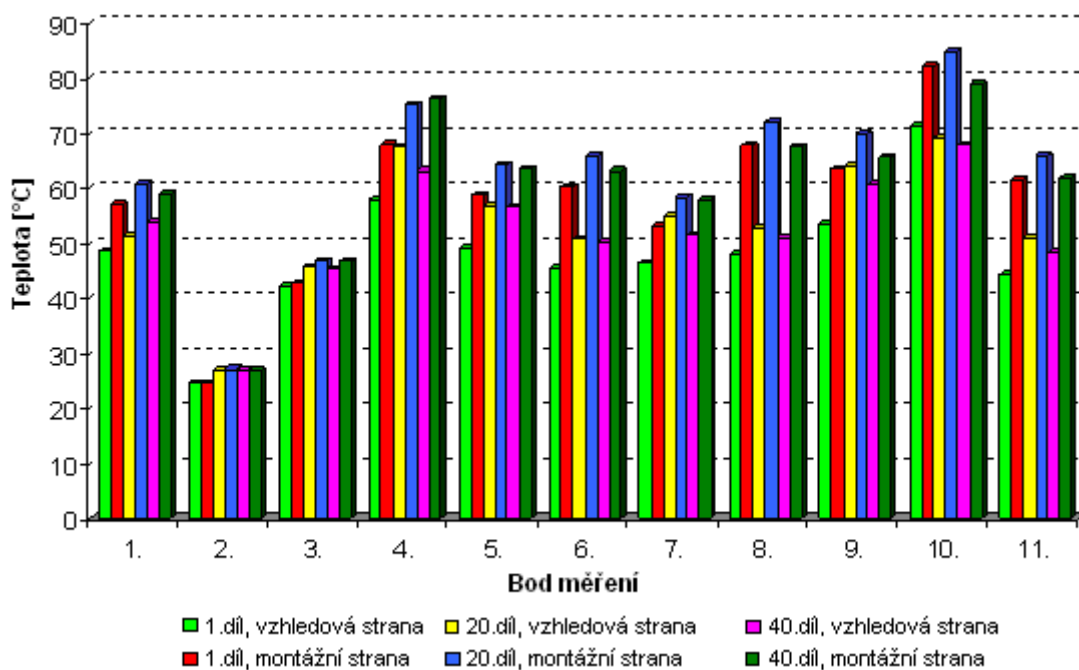


Obr. 3.17: Graf naměřených teplot na opěrce z ABS



Tab. 3.8: Naměřené teploty na opěrce z PP

Teploty povrchu [°C]						
Díl v sérii	1.		20.		40.	
Oblast měření	vzhled	montáž	vzhled	montáž	vzhled	montáž
1.	48,5	57	51,2	60,8	53,9	58,8
2.	24,5	24,5	26,8	27	26,8	26,8
3.	42,1	42,7	45,5	46,6	45,2	46,7
4.	57,9	67,8	67,4	75	63	76,1
5.	49,1	58,6	56,8	64,3	56,4	63,3
6.	45,4	60,2	50,5	65,7	50,1	63
7.	46,4	52,9	54,9	58,2	51,4	57,7
8.	48	67,7	52,7	72	50,8	67,4
9.	53,4	63,3	63,8	69,8	60,6	65,6
10.	71	82	69,1	84,6	67,7	78,7
11.	44,3	61,4	50,8	65,9	48,2	61,9
Nejvyšší teplota	71	82	69,1	84,6	67,7	78,7
Nejnižší teplota	24,5	24,5	26,8	27	26,8	26,8
Rozdíl teplot	46,5	57,5	42,3	57,6	40,9	51,9



Obr. 3.18: Graf naměřených teplot na opěrce z PP

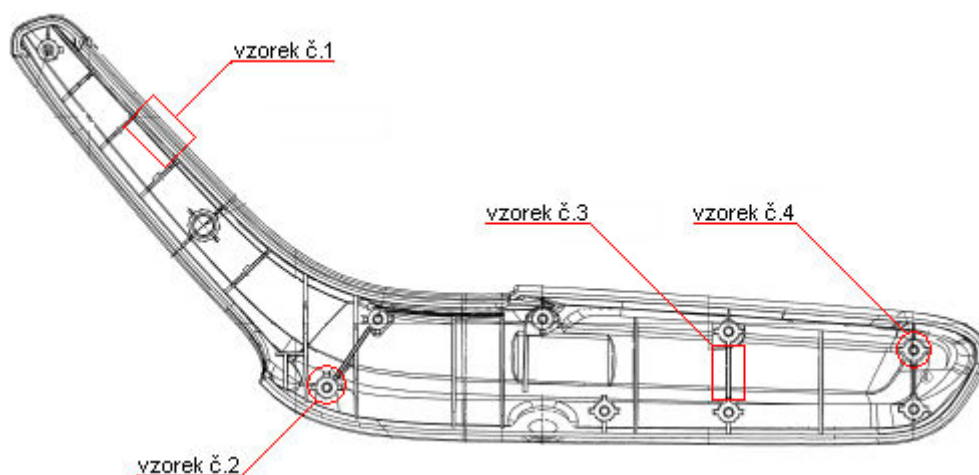
3.7 Nadmolekulární struktura

Po výsledcích z termovizního měření, ve kterém bylo naměřeno na vzorcích z PP i ABS výrazně nerovnoměrné teplotní pole po vyjmutí výstřiku z formy, následovalo měření nadmolekulární struktury pomocí polarizačního mikroskopu. Měření probíhalo na vzorcích z PP (viz. kap. 3.1). Výrobek byl pro experimentální část diplomové práce vstřikován v sérii 40 kusů, přičemž pro hodnocení nadmolekulární struktury byl vybrán každý pátý díl.

Příprava vzorků pro polarizační mikroskopii probíhala na mikrotomové řezačce (viz. obr. 2.32 v kap. 2.8), pomocí které byly vzorky řezány na tloušťku 9 μm . Takto tenký vzorek byl poté pinzetou přemístěn na podložní sklíčko s kapkou imersního oleje a překlopen krycím sklíčkem. Následovalo již jen umístění pod objektiv na otočný stolek mikroskopu.

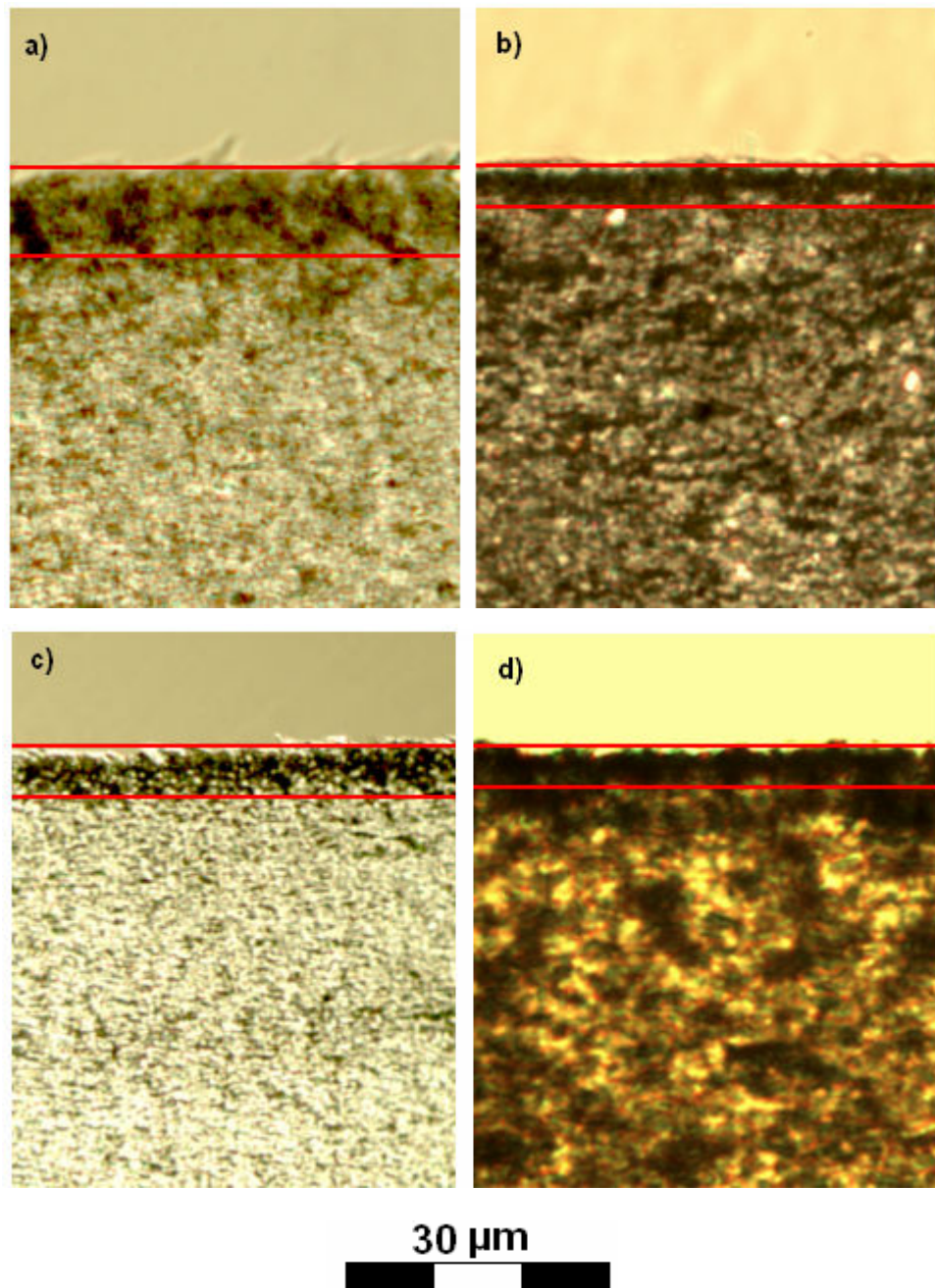
Snímky struktury řezů jednotlivých vzorků byly pořízeny na polarizačním mikroskopu (princip vysvětlen v kap. 2.9) s použitým zvětšením objektivu 20x a poté pomocí datového kabelu převedeny do počítače a následně zpracovány pro lepší názornost vhodným softwarem.

Na obr. 3.19 jsou schématicky znázorněna místa, odkud byly řezány vzorky pro zjišťování struktury výstřiku. Z každého zvoleného dílu byly vybrány 4 vzorky z různých oblastí na výrobku, které vykazovaly odlišnou teplotu po vyjmutí z formy (viz. tab. 3.7, tab.3.8). Vzorek č.1 pochází ze stěny opěrky nacházející se v oblasti s nejnižší teplotou zjištěnou při termovizním měření, vzorky č.2 a č.4 byly odebrány z montážních výstupků naopak s nejvyšší teplotou po vyjmutí z formy a vzorek označený číslem 3 byl odebrán z tenké přepážky spojující dva montážní výstupky.



Obr. 3.19: Schématické znázornění výběru vzorků pro sledování morfologie výstřiku

Celkem byla nadmolekulární struktura výstřiku měřena na 8 dílech vybraných z vyrobené série. Vzhledem k nepatrným odchylkám ve struktuře u jednotlivých dílů série, byl jako referenční vzorek vybrán díl s číslem 20 nacházející se uprostřed vyrobené série. Strukturu tohoto vzorku ve 4 odlišných místech měření ukazuje obr. 3.20. Velikost povrchové vrstvy je zvýrazněna červenými přímkami. Popis vzorků je shodný s obr. 3.19.



Obr. 3.20: Srovnání struktury řezu v různých místech na výstřiku z PP:

a) vzorek č. 1

b) vzorek č. 2

c) vzorek č. 3

d) vzorek č. 4

4. VYHODNOCENÍ

4.1 Vyhodnocení termovizního měření

Pro lepší přehlednost je vyhodnocení termovizního snímání povrchu loketní opěrky rozděleno do dvou částí, přičemž první část se zabývá hodnocením výstřiku z amorfního termoplastu ABS, druhá část se zabývá výstřikem ze semikrystalického PP.

U loketní opěrky z amorfního termoplastu ABS se jako nejchladnější bod na výstřiku po vyjmutí z formy u všech dílů v sérii jevil bod č.2 znázorněný na schématu na obr. 3.15. Jde o oblast madla opěrky, v jejíž těsné blízkosti veden temperační kanál. Oproti tomu bod s nejvyšší naměřenou teplotou, která dosahovala hodnot přes 70 °C po vyjmutí z formy, byl bod č.10 nacházející se v oblasti montážního výstupku. Nejvyšší teplota povrchu v tomto místě výstřiku byla způsobena kromě nemožnosti vést v těsné blízkosti temperační kanál také hromaděním materiálu a rozdílnou tloušťkou stěn. Navíc se velmi blízko tohoto výstupku nachází další montážní výstupek, ve schématu zakreslený jako bod č.11, který svou polohou brání účinnějšímu odvodu tepla, neboť temperační kanál není veden mezi těmito výstupky, ale podél obvodu výstřiku. Rozdíl mezi nejchladnějším a nejteplejším místem na montážní straně výstřiku (tj. mezi body č.2 a 10 na obr. 3.15) činil u prvního dílu v sérii 48,8 °C, u posledního dílu v sérii byl rozdíl již 53,1 °C. Nárůst teplot činí 4,3 °C (tedy o 8,8 %). Méně znatelný byl nárůst u vzhledové strany opěrky, která celkově dosahovala nižších teplot než strana montážní. Nárůst teplot v tomto případě činil pouze 1,3 °C, tedy 2,6 %. Příčinami tohoto pozvolnějšího nárůstu teplot byly jednak pozvolné přechody mezi rozdílnými tloušťkami stěn, a dále vyšší účinnost temperačního systému, neboť vzhledová strana výstřiku (tj. strana tvárnice) byla chlazena čtyřmi temperačními okruhy oproti třem chladícím okruhům na straně tvárníku. Patrný je také nárůst nejvyšších teplot a to ze 71,9 °C u prvního dílu v sérii na 78,8 °C u 40.dílu v sérii.

Obdobný průběh teplot vykazovaly i vzorky z PP. Opět jako nejchladnější místo výstřiku se ukázalo madlo (bod č.2), místo s nejvyšší teplotou bylo opět na montážním výstupku (bod č.10). Hodnoty byly ale celkově o několik stupňů vyšší než u opěrky z ABS (nejvyšší teplota byla naměřena u 20.dílu v sérii a to 84,6 °C v bodě 10). Rozdíly v minimální a maximální teplotě byly také vyšší než u ABS, na montážní straně výstřiku se pohybovaly kolem 57 °C, na vzhledové straně dokonce klesaly ze 46,5 °C v 1.dílu v sérii na 40,9 °C ve 40.dílu v sérii.

Z naměřených dat pro materiál ABS uvedených v tab. 3.7 a pro materiál PP uvedených v tab. 3.8 vyplývá, že standardní metodou chlazení forem temperačními kanály s cirkulující vodou v tomto případě není dosaženo rovnoměrného teplotního pole na výstřiku. Konstrukce temperačního systému byla do jisté míry ovlivněna prostorem ve formě, zejména pak konstrukcí vyhazovacího systému. To zřejmě zapříčinilo velké teplotní rozdíly mezi jednotlivými oblastmi na výstřiku, které dále zvětšovaly s přírůstkem dílů v sérii (u materiálu ABS).

4.2 Vyhodnocení nadmolekulární struktury

Při experimentálním měření nadmolekulární struktury jednotlivých vzorků loketní opěrky z polypropylenu byla použita metoda pozorování mikrotomových řezů v polarizovaném světle optického mikroskopu. Pro strukturní analýzu byl z vyrobené série 40 dílů vybrán každý pátý díl. Vzorky byly tedy odebrány z osmi loketních opěrek a to z oblastí, které vykazovaly po vyjmutí z formy nejvýraznější odlišnosti teplot. Cílem měření porovnat velikost celkové povrchové vrstvy jednotlivých vzorků v závislosti na rychlosti ochlazování výstřiku.

Nadmolekulární struktura byla porovnávána:

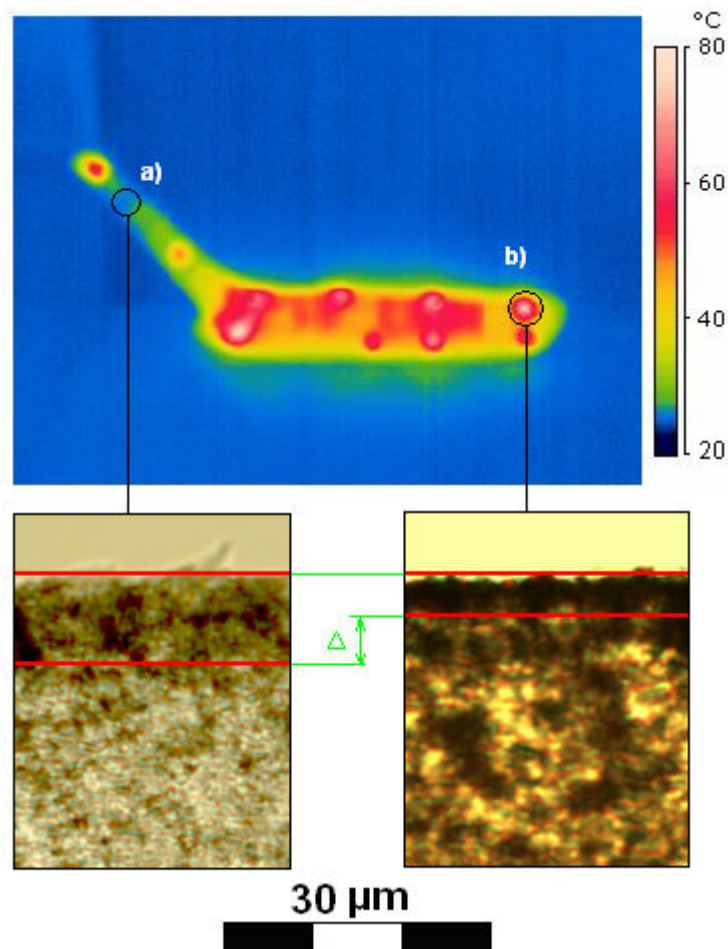
- a) mezi vzorky, které byly odebrány ze stejných oblastí na výstřiku u různých dílů vyrobené série
- b) mezi vzorky, které byly odebrány z různých oblastí jednoho dílu vyrobené série

Při analýze nadmolekulární struktury a porovnávání velikosti povrchové vrstvy nebyly zjištěny výraznější odlišnosti mezi stejnými oblastmi u různých dílů z výrobní série. Tato skutečnost je přičítána jen nepatrným teplotním výkyvům při chlazení výstřiku, neboť teplota povrchu ve stejných oblastech na výstřiku se po vyjmutí z formy odlišovala mezi jednotlivými díly v sérii jen o $\pm 5^\circ\text{C}$.

Znatelnější odlišnosti v tloušťce povrchové vrstvy byly zjištěny u vzorků odebraných z různých oblastí téhož dílu (viz. obr. 3.20). Tloušťka povrchové vrstvy byla vyhodnocena jako nejmenší u vzorků z oblasti montážního výstupku, na kterém byla naměřena nejvyšší teplota po vyjmutí z formy při termovizním měření (bod č.10 na obr. 3.16). Naopak největší tloušťku povrchové vrstvy vykazoval vzorek odebraný ze stěny opěrky v oblasti madla. Oblast madla na loketní opěrce byla při měření termokamerou vyhodnocena jako nejchladnější, tzn. odvod tepla z této části byl při procesu chlazení nejintenzivnější. Mezi těmito dvěma vzorky byl po vyjmutí z formy naměřen největší teplotní rozdíl a z tohoto důvodu výsledky měření potvrdily závislost mezi teplotou povrchu dutiny formy a tloušťkou povrchové vrstvy.

Tato závislost se shoduje s teoretickými předpoklady o povrchové vrstvě a udává, že s rostoucí teplotou výstřiku, respektive formy (nebo-li pomalejším ochlazováním), klesá tloušťka povrchové vrstvy a naopak. Podrobnější popis tohoto jevu je vysvětlen v teoretické části diplomové práce v kap. 2.2.2.1.

Na obr. 3.21 jsou porovnány velikosti povrchové vrstvy na vzorcích odebraných z míst na opěrci o nejnižší a nejvyšší teplotě po vyjmutí z formy (maximální teplotní rozdíl na výstřiku byl naměřen po vyjmutí z formy 57,6 °C, viz. tab. 3.8). Rozdíl v tloušťce povrchové vrstvy je na obr. 3.21 znázorněn jako Δ .



Obr. 3.21: Maximální rozdíl v tloušťce povrchové vrstvy při teplotě povrchu výstřiku: a) 27 °C
b) 84,6 °C



5. KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA FORMY PRO POUŽITÍ CO₂

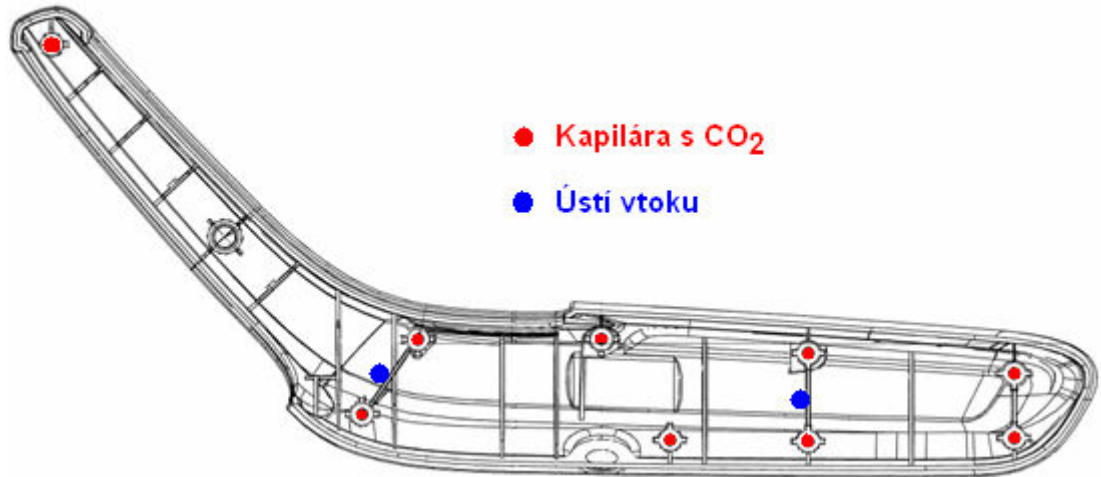
Na základě provedení termické analýzy a vyhodnocení nadmolekulární struktury u vybraného dílu byl proveden návrh konstrukčních úprav stávající formy pro možnou aplikaci bodového chlazení s CO₂. Jak bylo vysvětleno v teoretické části této diplomové práce, bodové chlazení pomocí kapalného CO₂ je umožněno přívodem chladicího média v kapilárách do obtížně přístupných míst ve formě (viz. kap. 2.7.3). Intenzita odvodu tepla je dána množstvím média (CO₂), které je vypouštěno do expanzního prostoru prostřednictvím kapilár v časových impulsech. Na základě termické analýzy teplotních polí na povrchu ložetní opěrky byly určeny oblasti s nejvyšší teplotou po vyjmutí z formy. V uvedených oblastech zůstává tavenina plastu při vstřikování nejdéle v tekutém stavu a tedy tato místa nejvíce prodlužují dobu chlazení a zároveň i celého cyklu. Jsou to zejména oblasti v okolí místa vtoku nebo oblasti s hromaděním materiálu.

Nedostatečně účinné chlazení těchto oblastí způsobuje nerovnoměrné teplotní pole na výstřiku, které má za následek vznik vnitřního pnutí, vznik propadlin, rozměrovou nestálost nebo odlišnosti v lesku.

Systém bodového chlazení s použitím kapalného CO₂ je vhodný způsob jak zvýšit účinnost chlazení ve zmíněných oblastech na výstřiku. Jednou z hlavních výhod tohoto systému odvodu tepla z výstřiku jsou minimální konstrukční úpravy u stávajících forem při jeho zavádění.

Pro maximální efektivnost odvodu tepla z problematických míst na výrobku je nutné přivést kapalný CO₂ v kapilárách co nejbližší tvarové dutině formy, zejména do oblastí montážních výstupků. Konstrukční úprava formy pro výrobu ložetní opěrky spočívá ve zhotovení kanálů pro vedení kapilár, které se umístí do jader tvořících dutinu montážních výstupků. Možnou komplikací představuje tvar jader, zejména jejich délka a malý průměr. Vzhledem k vnějšímu průměru jader 4 – 5 mm je zapotřebí zhotovit kanály dlouhé 290 – 320 mm v závislosti na délce jednotlivých montážních výstupků, respektive délce jejich jader. Průměr kanálů ve všech případech činí 2 mm. Pro zhotovení kanálů při takto náročných parametrech výroby přichází v úvahu především elektroerozivní obrábění, které je vhodné pro obrábění složitých tvarů s velkou přesností. Vzhledem k velmi malému průměru jader (4 – 5 mm) je nutné použít kapiláry o průměru 0,8 mm. Délka každé kapiláry je s přihlédnutím k délce vodících kanálů a k poloze solenoidových ventilů volena 1 m. Poslední konstrukční úpravou formy je přichycení solenoidových ventilů k boční straně formy.

Rozmístění kapilár pro přívod CO₂ je schematicky zakresleno na obr. 3.22. Kapiláry se umístí pouze ze strany tvárníku, neboť hlavním cílem je chlazení všech 9 montážních výstupků na nevzhledové straně opěrky (tj. na straně tvárníku).



Obr. 3.22: Ideální rozmístění kapilár pro přívod CO₂

6. ZÁVĚR

Neustále se zvyšující požadavky na kvalitu plastových dílů vedou k rostoucímu významu problematiky temperace vstřikovacích forem. Temperací vstřikovací formy se rozumí řízené ochlazování nebo ohřev tvářecích částí formy (tvárníku a tvárnice) a udržení na této teplotě během celého procesu vstřikování. Na kvalitu dílu, jeho lesk, mechanické vlastnosti nebo rozměrovou stabilitu má však velký podíl způsob odvodu tepla z výstřiku. Jelikož je technologie vstřikování plastů vhodná zejména pro velkosériovou a hromadnou výrobu, nabývá na významu délka chlazení výstřiku, neboť je nejdelším časem cyklu a má tedy největší vliv na hodinovou produkci výroby. Z hlediska vlastností výrobku je ideální postupný a rovnoměrný odvod tepla, aby bylo dosaženo homogenní rozložení teplotních polí na výstřiku. U tvarově složitých dílů je velmi problematické docílit rovnoměrného odvodu tepla z výstřiku, neboť konstrukce formy do značné míry neumožňuje vést temperační systém místy, kde by byla jeho činnost nejefektivnější.

Z tohoto důvodu bylo cílem diplomové práce navrhnout konstrukční úpravy vstřikovací formy pro použití nekonvenční metody bodového chlazení pomocí CO₂. Použita byla již zaběhnutá forma s konvenčním temperačním systémem, který tvořily kanály s cirkulujícím teplotním médiem (vodou). Vstřikovaným dílem byla loketní opěrka montovaná do automobilu Audi A3. Na montážní straně opěrky se nachází výstupky, které svým tvarem, polohou a množstvím materiálu velmi prodlužují dobu chlazení a tedy i celkovou dobu cyklu při použití současného temperačního systému (temperační kanály s proudící vodou).

V teoretické části této diplomové práce byl kladen důraz na popis vlivů temperačního systému na vlastnosti výrobku, zejména vliv na nadmolekulární strukturu, smrštění, lesk apod. Dále je v teoretické části uveden princip jednotlivých metod temperace (konvenčních i nekonvenčních metod) a zejména vysvětlení obou způsobů odvodu tepla z výstřiku pomocí CO₂ a to jak technologií TOOLVAC®, tak bodovým chlazením.

Experimentální část byla rozdělena do dvou okruhů. V první části bylo měření teplotních polí na povrchu výstřiku bezdotykovým způsobem pomocí termovizní kamery. Výstřiky, u nichž byla monitorována teplota po vyjmutí z formy byly vyrobeny ze dvou materiálů (amorfního termoplastu Lustran ABS H801 a semikrystalického termoplastu SABIC PP compound 2500/3). Výsledky měření naznačily, že použitím stávajícího způsobu chlazení temperačními kanály s cirkulující vodou je dosaženo výrazně nerovnoměrného teplotního pole na povrchu výstřiku. Jedním z hlavních důvodů je konstrukce formy a nemožnost vést temperační kanály místy, kde by

odváděly teplo nejefektivněji (tzn. v bezprostřední blízkosti montážních výstupků). Druhým okruhem experimentální části bylo měření nadmolekulární struktury pomocí polarizačního mikroskopu. K tomuto měření byly použity opěrky pouze ze semikrystalického PP. Výsledkem bylo porovnání struktury vzorků (zejména tloušťky celkové povrchové vrstvy) odebraných z jednotlivých oblastí na výstřiku, které vykazovaly rozdílné teploty po vyjmutí z formy. Závěrem tohoto měření byl potvrzen teoretický předpoklad o vzájemné souvislosti mezi rychlostí ochlazování výstřiku a tvorbou celkové povrchové vrstvy.

Výsledkem měření uvedených v experimentální části diplomové práce je návrh konstrukčních úprav vstřikovací formy pro použití bodového chlazení využívající k odvodu tepla z výstřiku změnu skupenství CO₂ (viz. kap. 5). Bodové chlazení pomocí CO₂ je použito pouze jako doplňková metoda odvodu tepla z výstřiku, přičemž původní temperační systém s kanály a teponosným médiem je ve vstřikovací formě zachován.

Jelikož k datu odevzdání diplomové práce nebyla forma konstrukčně upravena pro přívod CO₂ dle návrhu popsaného v kap. 5, nebylo možné toto chlazení vyzkoušet v sériové výrobě. Tudíž je nutné brát návrh na konstrukční úpravu formy s rozmístěním kapilár pro přívod CO₂ do jader tvořících dutinu výstupků pouze jako ideální, ale v úvahu mohou přicházet i jiné varianty rozmístění (např. radiální rozložení dvou a více expanzních komor okolo jednoho montážního výstupku). Po vyzkoušení bodového chlazení s CO₂ na konkrétním dílu by bylo možné umístění kapilár pozměnit. Vše by bylo závislé na výsledcích měření, jejichž obdobná podoba je uvedena v experimentální části této diplomové práce (tzn. opětovné měření teplotních polí a vyhodnocení struktury výstřiku, ale již při použití bodového chlazení s CO₂).



LITERATURA

- /1/ KREBS, J.: *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Liberec: TU v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-133-3.
- /2/ http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp (únor 2008)
- /3/ <http://www.rostra.cz> (únor 2008)
- /4/ <http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/tzn.htm> (březen 2008)
- /5/ POUPA, T.: *Teplotní analýza vstřikovací formy při nekonvenčním způsobu temperování Ranque-Hilsch vírovou trubicí*. [diplomová práce], TU v Liberci, 2005
- /6/ BĚHÁLEK, L.: *Teplotní analýza vstřikovacích forem s ohledem na kvalitu plastových výrobků*. In Mezinárodní vědecké sympozium u příležitosti 25. výročí katedry tváření a plastů, 14.-15. září 2004. Liberec : TU v Liberci, 2004, s. 29-36. ISBN 80-7083-856-6.
- /7/ BĚHÁLEK, L.: Speciální temperační prostředky, In SOVA, A. - KREBS, J.: *Termoplasty v praxi*. Praha : Verlag Dashöfer Nakladatelství spol. s r.o. v Praze, 1999-2004, ISBN 80-86229-15-7.
- /8/ KOTLÍK, V.: *Princip a konstrukce tepelné trubice (Heat Pipe)*. Zpráva, 1.2.2007, publikováno na <http://www.svethardware.cz> (březen 2008)
- /9/ ŠAFAŘÍK, M.: *Nástroje pro tváření kovů a plastů-cvičení*. TU v Liberci, 1991, ISBN 80-7083-014-X
- /10/ <http://tpe-u.com/tpu/emea/de/docguard/A1104.pdf> (Bayer MaterialScience)
- /11/ http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/vip/ (únor 2008)
- /12/ ZÖLLNER, O.: *Optimised Mould Temperature Contro*. Application Technology Information ATI 1104d, e, 30.11.97.



- /13/ LENFELD, P.: *Technologie II.-2. část*. TU v Liberci, 2006, ISBN 80-7372-037-X
- /14/ BOBEK, J.: *Aplikace tepelné trubice ve fázi chlazení procesu vstřikování Polypropylenů*. [diplomová práce], TU v Liberci, 2007
- /15/ <http://www.vscht.cz/fch/prikladnik/zkhtml/p.1.2.23.html> (duben 2008)
- /16/ http://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_uhli%C4%8Dit%C3%BD (duben 2008)
- /18/ http://www.irz.cz/latky/oxid_uhlicity (duben 2008)
- /19/ Linde Gas a.s.: *Cooling of injection moulds with CO₂ (Spot Cooling)*. The innovative Technology, Andreas Praller, SDC
- /20/ <http://www.linde-gas.com/international/web> (duben 2008)
- /21/ http://www.carttech.com/news/porous_tooling_cppjun2006.html (duben 2008)
- /22/ <http://www.pnl.gov/energy/tooling/presentations> (duben 2008)
- /23/ The Chemical Company BASF: *Estimating cooling times in injection molding*. Technical Expertise. Publikováno na <http://www.plasticsportal.com/usa> (duben 2008)
- /24/ BĚHÁLEK, L.: *Hodnocení nadmolekulární struktury plastů*. Za podpory projektu In-TECH (reg.č. CZ.04.1.03/3.2.15.2/0215) Evropského sociálního fondu (ESF projekt v opatření 3.2)
- /25/ http://www.vscht.cz/sls/vyzkum/metody/polarizacni_mikroskopie.htm (duben 2008)
- /26/ <http://dektrade.sk/pdf/dektime/2006/dektime01.pdf> (duben 2008)
- /27/ <http://automatizace.hw.cz/infracervene-detektory-termokamery> (duben 2008)



- /28/ <http://www.thermascan.co.uk/assets/sales/p65/index.html> (duben 2008)

- /29/ <http://www.designtech.cz/c/plm/k-plastovemu-dilu-cesta-dlouha.htm> (duben 2008)

- /30/ Materiálový list Lustran ABS H801

- /31/ Materiálový list SABIC PP compound 2500/3

- /32/ Manuál temperačního agregátu Tool – Temp 156E

- /33/ www.plasticker.de/requipement/showdata_en (duben 2008)

- /34/ Interní zdroje Cadence Innovation, Libáň

- /35/ <http://www.flirthermography.co.uk/cameras> (květen 2008)



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121 / 2000 Sb. o právu autorském, zejména §60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci, 23. května 2008

Podpis



Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

In Liberec, 23. may 2008

Signature